



Centro Universitário de Brasília – UniCEUB
FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS -
FATECS
Curso de Engenharia da Computação

Hugo de Souza Santos

Ajuste de Controle PID utilizando

Algoritmo Genético

Brasília
2009

Hugo de Souza Santos

Ajuste de Controle PID utilizando Algoritmo Genético

Trabalho apresentado ao Centro
Universitário de Brasília (UNICEUB) Como
pré-requisito para a obtenção de Certificado
de Conclusão do Curso de Engenharia da
Computação.

Orientador: Prof. José Julimá Bezerra Junior

Brasília
2009

Dedico este projeto aos meus
avós Osmar e Maria do Carmo, que
com amor, carinho e dedicação me
ensinaram a lutar sempre e desistir
nunca.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por esta sempre presente em minha vida.

À minha amada Mãe, Osane, por ser a melhor escola.

À minha Madrinha, Geralda, por ser a minha amiga e conselheira.

À minha Tia Onir, por estar na arquibancada da vida sempre torcendo por mim.

À minha Tia Oldeir e o meu Tio Carlos, pelo apoio na caminhada.

Aos meus Tios Osmar, Omar e Oleomar, por serem os meus exemplos.

Às minhas Tias, pelo carinho.

Aos meus primos e primas pela compreensão, torcida e saber sempre o tanto que caminhei para chegar até aqui.

À minha amada namorada Marina e família pelo carinho, dedicação e ser sempre companheira.

Ao meu Orientador Jose Julimá pelos conhecimentos passados e atenção para a realização do trabalho.

Aos meus professores, pelo conhecimento passado.

Aos meus amigos, que me incentivaram a chegar até o fim do curso e à realização do trabalho.

RESUMO

Utilizando simulações computacionais, o objetivo proposto neste projeto é ajustar os parâmetros do controlador PID visando obter uma resposta do sinal de um sistema estudado o mais próximo possível de um sinal de um sistema com critérios de desempenhos pré-estabelecidos. Para alcançar tal êxito, foi definido um critério de otimização que consiste em atuar nos parâmetros do PID a fim de minimizar a norma infinita da diferença das funções de transferências do sistema de malha fechada real e o sistema de malha fechada ideal. O sistema de malha fechada real é composto de um motor de corrente continua controlado pelo PID. Enquanto o sistema de malha fechada ideal é propositalmente criado com objetivo de gerar um sinal desejado. O ajuste dos parâmetros do PID é realizado pelos Algoritmos Genéticos. Para avaliar os resultados são apresentados gráficos que mostram a resposta no tempo e na frequência.

Palavras-chave: Algoritmos Genéticos, otimização, Controlador PID

ABSTRACT

Using computer simulations, the proposed objective in this project is to adjust the parameters of PID controller to obtain a response signal of a system studied, the closest to a signal of a system with performance criteria pre-established. To achieve such success was defined as a criterion of optimization, is to act on the PID parameters to minimize the infinite norm of the difference of the functions of transfers of closed loop system real and ideal closed loop system. The real closed loop system is composed of a current motor controlled by PID. While the ideal closed loop system is purposely created in order to generate a desired signal. The adjustment of the PID parameters is performed by Genetic Algorithms. To evaluate the results are presented graphs showing the response in time and frequency.

Keywords: Genetic Algorithms, optimization, PID Controller

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Reação entre o processo de evolução e um problema a ser resolvido computacionalmente	30
Tabela 3.1 – Parâmetros do Controlador no Matlab.....	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 - Curvas de Resposta ao degrau unitário – Sistema Ideal 1	44
Gráfico 3.2 - Curvas de Resposta ao degrau unitário – Sistema Ideal 2	45
Gráfico 3.3 – Curvas de resposta ao degrau unitário- Sistema ideal e Sistema Real – Simulação 1	49
Gráfico 3.4 – Zeros e Pólos – Simulação 1	49
Gráfico 3.5 – Sintonia satisfatória – Simulação 1	50
Gráfico 3.6 - Curvas ao degrau unitário – Regime de permanente – Simulação 1....	51
Gráfico 3.7 - Diagrama de Bode – Simulação 1	52
Gráfico 3.8 – Curvas de resposta ao degrau unitário- Sistema ideal e Sistema Real – Simulação 2.....	54
Gráfico 3.9 – Zeros e Pólos – Simulação 2	54
Gráfico 3.10 – Sintonia satisfatória – Simulação 2	55
Gráfico 3.11- Curvas ao degrau unitário – Regime de permanente – Simulação 2...56	
Gráfico 3.12 - Diagrama de Bode – Simulação 2	56
Gráfico 3.13 – Curvas de resposta ao degrau unitário- Sistema ideal e Sistema Real – Simulação 3.....	58
Gráfico 3.14 – Zeros e Pólos – Simulação 3	58
Gráfico 3.15 – Sintonia satisfatória – Simulação 3	59
Gráfico 3.16 - Curvas ao degrau unitário – Regime de permanente – Simulação 3..60	
Gráfico 3.17 - Diagrama de Bode – Simulação 3	61
Gráfico 3.18 – Curvas de resposta ao degrau unitário- Sistema ideal e Sistema Real – Simulação 4.....	62
Gráfico 3.19 – Zeros e Pólos – Simulação 4	63
Gráfico 3.20 – Sintonia satisfatória – Simulação 4	64
Gráfico 3.21 - Curvas ao degrau unitário – Regime de permanente – Simulação 4..64	
Gráfico 3.22 - Diagrama de Bode – Simulação 4	65
Gráfico 3.23 – Curvas de resposta ao degrau unitário- Sistema ideal e Sistema Real – Simulação 5.....	66
Gráfico 3.24 – Zeros e Pólos – Simulação 5	67
Gráfico 3.25 – Sintonia satisfatória – Simulação 5	68
Gráfico 3.26 - Curvas ao degrau unitário – Regime de permanente – Simulação 5..69	
Gráfico 3.27 - Diagrama de Bode – Simulação 5	70

Gráfico 3.28 – Curvas de resposta ao degrau unitário- Sistema ideal e Sistema Real – Simulação 6.....	72
Gráfico 3.29 – Zeros e Pólos – Simulação 6	73
Gráfico 3.30 – Sintonia satisfatória – Simulação 6	73
Gráfico 3.31 - Curvas ao degrau unitário – Regime de permanente – Simulação 6..	74
Gráfico 3.32 - Diagrama de Bode – Simulação 6	75
Gráfico 3.33 – Curvas de resposta ao degrau unitário- Sistema ideal e Sistema Real – Simulação 7.....	77
Gráfico 3.34 – Zeros e Pólos – Simulação 7	77
Gráfico 3.35 – Sintonia satisfatória – Simulação 7	78
Gráfico 3.36 - Curvas ao degrau unitário – Regime de permanente – Simulação 7..	79
Gráfico 3.37 - Diagrama de Bode – Simulação 7	79
Gráfico 3.38 – Curvas de resposta ao degrau unitário- Sistema ideal e Sistema Real – Simulação 8.....	81
Gráfico 3.39 – Zeros e Pólos – Simulação 8	81
Gráfico 3.40 – Sintonia satisfatória – Simulação 8	82
Gráfico 3.41 - Curvas ao degrau unitário – Regime de permanente – Simulação 8..	83
Gráfico 3.42 - Diagrama de Bode – Simulação 8	84
Gráfico 3.43 – Resposta ao degrau do sistema da simulação 3	86
Gráfico 3.44 – Resposta ao degrau do sistema da simulação 5	87
Gráfico 3.45 – Resposta ao degrau do sistema da simulação 6	89
Gráfico 3.46 – Resposta ao degrau do sistema da simulação 8	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Ajuste do controlador PID utilizando Algoritmos Genéticos	16
Figura 2.1 – Modelagem de Motor de Corrente Contínua	17
Figura 2.2 – Função de Transferência	19
Figura 2.3 – Resposta temporal de um sistema para um degrau unitário	20
Figura 2.3 – Diagrama de Bode	21
Figura 2.4 – Sistema de controle.....	22
Figura 2.5 – Pólos e Zeros	23
Figura 2.6 – Controlador PID de uma planta.....	24
Figura 2.7 – Controlador PID 1 de uma planta.....	25
Figura 2.8 – Controlador PID 2 de uma planta.....	26
Figura 2.9 – Diagrama de fiação (a) e esboço (b) de um motor CC.....	27
Figura 2.10 – Cruzamento de dois indivíduos	33
Figura 2.11 – Operação de mutação.....	34
Figura 2.12 – Passos para o funcionamento do algoritmo genético.....	35
Figura 3.1 – Diagrama de blocos de um controlador PID 1 não-interativo	39
Figura 3.2 – Diagrama de blocos de um controlador PID 2 não-interativo	40
Figura 3.3 – Diagrama de Blocos.....	42
Figura 3.4 – Diagrama de Blocos em série	42
Figura 3.5 – Função de Transferência	43
Figura 3.6 – Diagrama do modelo teórico	43
Figura 3.7 – Fluxograma de metodologia proposta	47
Figura 3.8 – Simulação 1 – Ajuste do controlador PID.....	48
Figura 3.9 – Simulação 2 – Ajuste do controlador PID.....	53
Figura 3.10 – Simulação 3 – Ajuste do controlador PID.....	57
Figura 3.11 – Simulação 4 – Ajuste do controlador PID.....	62
Figura 3.12 – Simulação 5 – Ajuste do controlador PID.....	66
Figura 3.13 – Simulação 6 – Ajuste do controlador PID.....	71
Figura 3.14 – Simulação 7 – Ajuste do controlador PID.....	76
Figura 3.15 – Simulação 8 – Ajuste do controlador PID.....	80
Figura 3.16 – Sistema de controle – Simulação 3.....	85
Figura 3.17 – Sistema de controle – Simulação 5.....	86

Figura 3.18 – Sistema de controle – Simulação 6	88
Figura 3.19 – Sistema de controle – Simulação 8	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGs – Algoritmos Genéticos
PID – Proporcional Integral Derivativo
MCC – Motor de Corrente Continua
f.c.e.m – Força eletromotriz
Ra - Resistência de armadura
La - Indutância de armadura
Kb - Constante de f.c.e.m
J - Momento de Inércia do rotor
K - Constante de Torque
f - Coeficiente de Atrito
b - Razão de amortecimento do sistema mecânico
K - Constante de força eletromotriz
R - Resistência
L - Indutância
 Ω - Ohm, unidade de resistência elétrica
mH
V - Volts, unidade de tensão elétrica
Kg – Kilograma
M - Metro
N – Neltown, unidade de força
A - Ampère, unidade de corrente elétrica
W - Watt, unidade de potência
S - Segundo
dB - Decibel, relação de potência
rpm – Rotações por minuto
rad - Radiando

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	15
1.1 <i>Motivação</i>	15
1.2 <i>Objetivos</i>	15
1.3 <i>Estrutura da Monografia</i>	16
CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 <i>Tópicos de Sistema de Controle</i>	17
2.1.1 Modelagem	17
2.1.2 Sistemas Lineares	18
2.1.3 Função de Transferência	18
2.1.4 Resposta Temporal	19
2.1.5 Resposta em frequência (Diagrama de Bode)	20
2.1.6 O problema do controle	22
2.1.7 Pólos e Zeros	22
2.1.8 Norma	23
2.2 <i>Controlador Proporcional - Integral – Derivativo - PID</i>	24
2.2.1 Controlador P	26
2.2.2 Controlador PI	26
2.2.3 Controlador PD	26
2.3 <i>Motor de Corrente Contínua</i>	27
2.4 <i>Algoritmos Genéticos – AGs (metodologia de otimização)</i>	29
2.4.1 Introdução	29
2.4.2 História	29
2.4.3 Inicialização da população	31
2.4.4 Função de avaliação	31
2.4.5 Seleção	31
2.4.5.1 Seleção por roleta	32
2.4.6 Reprodução	32
2.4.7 Cruzamento	32
2.4.8 Mutação	33
2.4.9 Funcionamento dos Algoritmos Genéticos	34

2.4.10 Vantagens e Desvantagens dos Algoritmos Genéticos	35
CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DAS SIMULAÇÕES.....	37
3.1 Conceitos iniciais.....	37
3.2 Razão do uso da tecnologia escolhida.....	37
3.3 Ajustando os parâmetros do Algoritmo genético	37
3.4 Planta do controlador PID	38
3.5 Planta do Motor de Corrente Contínua.....	40
3.6 Planta da Realimentação	42
3.7 Arquitetura do Sistema Real	42
3.8 Planta Ideal	44
3.9 Problemas e Soluções encontrados.....	45
3.10 Modelos.....	47
3.10.1 Simulação 1	48
3.10.2 Simulação 2.....	52
3.10.3 Simulação 3.....	57
3.10.4 Simulação 4.....	61
3.10.5 Simulação 5.....	65
3.10.6 Simulação 6.....	70
3.10.7 Simulação 7	75
3.10.8 Simulação 8.....	80
3.11 Experimento e Resultados	84
3.12 Resultados Obtidos	85
3.13 Entrada e saída do sistema.....	85
CAPÍTULO 4 - CONCLUSÃO	91
4.1 Conclusão	91
4.2 Análise do Projeto	92
4.3 Dificuldades encontradas	92
4.4 Sugestões de trabalhos futuros.....	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
APÊNDICE – A	96

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O controlador PID (proporcional, integral e derivativo) ainda é bastante utilizado na indústria. A sobrevivência desse controlador nesse setor explica-se pelo fácil manuseio nos ajustes de seus parâmetros, em que, na maioria das vezes, esses ajustes são feitos pelo método de tentativa e erro. Com isso, dependendo da complexidade do sistema, consegue-se alcançar os resultados desejados. Quanto mais complexo o sistema, mais cansativo e demorado tornam-se os ajustes desses parâmetros.

As aplicações na área de sistemas de controle exigem, cada vez mais, elevados padrões de desempenho. Estes podem ser estabelecidos visando à obtenção de resultados adequados em relação ao sistema de controle global. Os critérios de desempenho podem ser fixados a fim de tornar a resposta de regime permanente de um sinal mais rápida ou mais lenta, por exemplo.

1.2 Objetivos

O objetivo desse projeto é desenvolver ferramentas computacionais a fim de encontrar um controlador PID que satisfaça os critérios de desempenho de funcionamento para um modelo matemático de um motor de corrente contínua.

A figura 1.1 ilustra como, os Algoritmos Genéticos foram utilizados como uma ferramenta de otimização com objetivo de ajustar os parâmetros do PID a fim de minimizar a norma infinita da diferença das funções de transferências do sistema de malha fechada real ($H_r(s)$) e o sistema de malha fechada ideal ($H_i(s)$). O sistema de malha fechada ideal é propositalmente criado com o objetivo de gerar um sinal desejado. Este sistema de malha fechada ideal é concebido segundo as técnicas de controle linear para o sistema de primeira ordem.

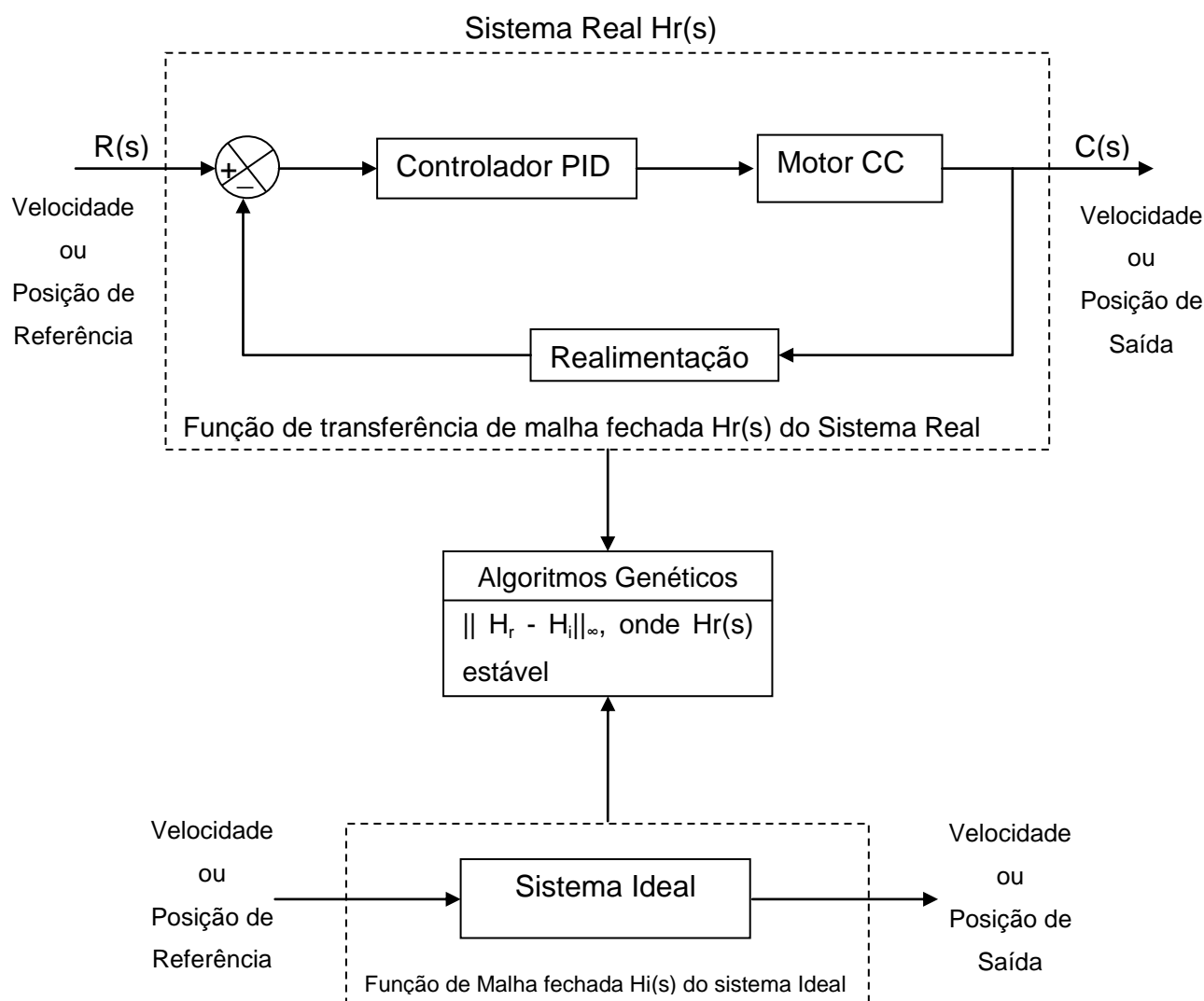


Figura 1.1 – Ajuste do controlador PID utilizando Algoritmos Genéticos

1.3 Estrutura da Monografia

Além deste capítulo, esta monografia está organizada em outros três:

- Capítulo 2: Referencial Teórico – São apresentados e discutidos os conceitos de Algoritmos Genéticos, Sistemas Lineares, Controlador PID e a eles relacionados que são essenciais à realização do projeto;
- Capítulo 3: Desenvolvimento das Simulações – São abordados os aspectos relativos às simulações computacionais, experimentos e resultados;
- Capítulo 4: Conclusão – Apresenta as principais conclusões obtidas dos resultados desta monografia e aponta perspectivas dos trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo destina-se à explanação de bases teóricas aplicadas pelo autor desse trabalho. Maiores explicações e aprofundamento sobre tais teorias estão nas referências bibliográficas.

2.1 Tópicos de Sistema de Controle

2.1.1 Modelagem

A modelagem matemática de um sistema dinâmico é definida como um conjunto de equações que representa a dinâmica do sistema. Um sistema é representado de maneiras diferentes e com isso pode-se ter vários modelos matemáticos, depende de como é a visão a ser considerada. [OGATA, 2003]

Muitos sistemas são descritos em termos de equações matemáticas como sistemas mecânicos, elétricos, térmicos, econômicos, biológicos entre outros. Para a modelagem de muitos desses sistemas são utilizadas leis como as Leis de Kirchhoff no sistema elétrico, e Lei de Newton com o sistema mecânico. [OGATA, 2003]

A figura 2.1 apresenta um pequeno exemplo de modelagem de motor de corrente contínua.

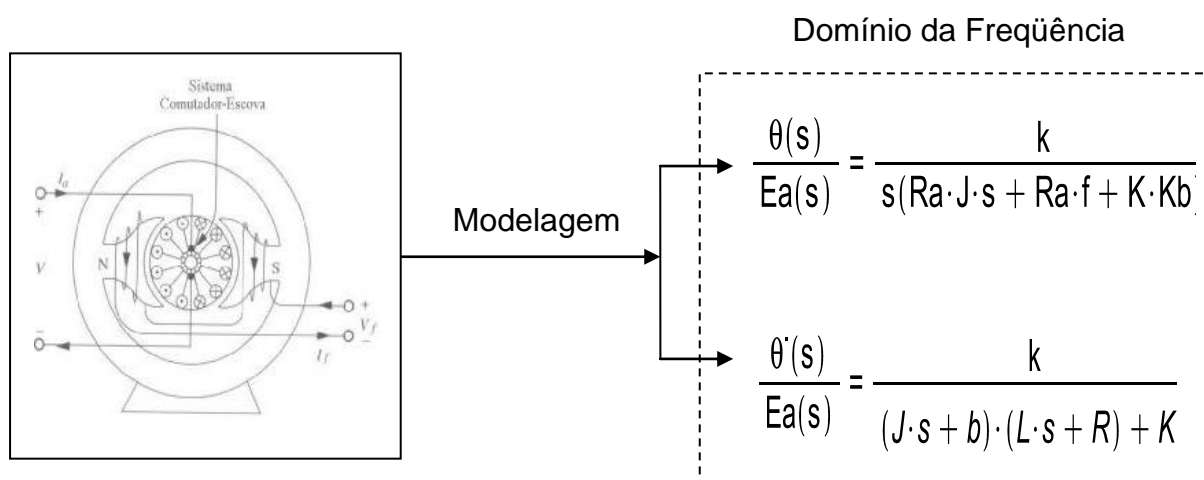


Figura 2.1 – Modelagem de Motor de Corrente Contínua

2.1.2 Sistemas Lineares

Segundo Ogata [2003], um sistema para ser considerado como linear deve ter o princípio da superposição aplicado a ele. O princípio da superposição é a resposta produzida pela aplicação simultânea de duas funções diversas e a soma das duas respostas individuais. Para um sistema linear, a resposta a diversas entradas pode ser calculada tratando uma entrada de cada vez e somando os resultados. Esse princípio é que permite construir soluções complicadas para equações diferenciais lineares a partir de soluções simples.

Os sistemas estudados neste trabalho são todos lineares.

2.1.3 Função de Transferência

Na teoria de controle, as funções de transferência são comuns à sua utilização para caracterizar as relações de entrada e saída de componentes ou de sistemas que podem ser representados por equações diferenciais lineares invariantes no tempo. A função de transferência é definida como a relação entre a transformada de Laplace da saída (Função de resposta) e a transformada de Laplace da entrada (Função de Excitação). Para representar a função de transferência é possível representar a dinâmica de um sistema por meio de uma equação algébrica em s . Se maior for a potência de s no denominador e a função for igual a n , o sistema será caracterizado como *sistema de ordem n* . [OGATA, 2003] [PHILLIPS, 1996]

A aplicação do conceito da função de transferência é limitada a sistemas de equações diferenciais e lineares invariantes no tempo. A função de um sistema é um modelo matemático que representa a equação diferencial que é relacionada à variável de saída e à variável de entrada. A função de transferência é uma propriedade inerente ao sistema, que não depende da magnitude e da natureza da função de entrada ou de excitação. [OGATA, 2003] [PHILLIPS, 1996]

Conhecendo a função de transferência, a saída ou a entrada poderá ter várias maneiras de entrada, respeitando os limites do sistema. Caso não seja conhecida, ela pode ser determinada fazendo várias tentativas para determinar com ajuda das entradas e de estudo as respectivas respostas do sistema. Determinando a função de transferência serão conhecidas as características dinâmicas do sistema, independente de sua descrição física. [OGATA, 2003]

A figura 2.2 mostra um exemplo do livro de Ogata:

$$G(s) = \frac{\mathcal{L}[\text{saída}]}{\mathcal{L}[\text{Entrada}]} \Big|_{\text{condições iniciais iguais a zero}}$$

$$= \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 \cdot s^m + b_1 \cdot s^{m-1} + \dots + b_{m-1} \cdot s + b_m}{a_0 \cdot s^n + a_1 \cdot s^{n-1} + \dots + a_{n-1} \cdot s + a_n}$$

Figura 2.2 – Função de Transferência

Fonte: [OGATA, 2003]

2.1.4 Resposta Temporal

A resposta temporal de um sistema de controle é constituída de duas partes: a resposta transitória e a resposta estacionária. Para a resposta transitória o estado vai do inicial ao estado final. Para a resposta estacionária, o sinal de saída do sistema é a medida em que t tendente ao infinito. [OGATA, 2003]

Na prática, as características do desempenho desejado de um sistema de controle são especificadas em termos de grandezas no domínio do tempo. Com a frequência, as características do desempenho do sistema de controle são caracterizadas em termos de resposta transitória a uma entrada de degrau unitário. Trata-se de entradas bruscas e geradas com facilidade. [OGATA, 2003]

Dada uma entrada de degrau unitária, a resposta transitória vai depender das condições iniciais. Uma prática comum é comparar entre as respostas transitórias de vários sistemas uma condição inicial padrão e em repouso, e com o valor da variável de saída a todas as suas derivadas em função do tempo iguais a zero. Com isso, as características dos vários sistemas poderão ser comparadas com facilidade. [OGATA, 2003]

Para representação de sistemas lineares com o Matlab, a função de transferência de um dado sistema é representada por arranjos de número na forma de um vetor-linha. Para representar o sistema são necessários dois vetores linhas, cada um com os coeficientes dos polinômios com potências de s em ordem decrescente. Para obter a resposta ao degrau usa-se o comando *step*. [OGATA, 2003]

A figura 2.3 mostra um exemplo clássico da resposta temporal de um sistema para uma entrada de degrau unitário.

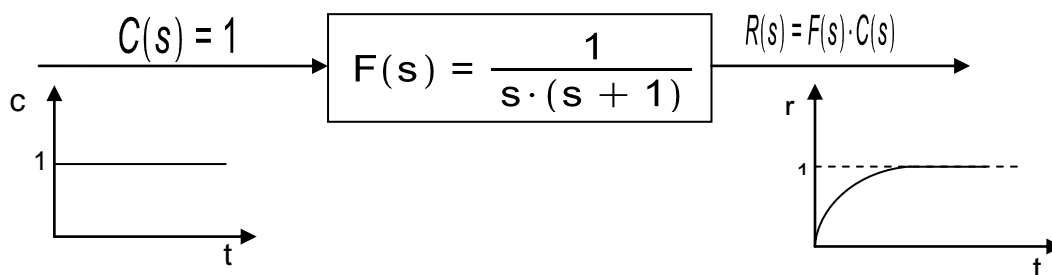


Figura 2.3 – Resposta temporal de um sistema para um degrau unitário

2.1.5 Resposta em frequência (Diagrama de Bode)

A resposta em frequência é o comportamento da saída em regime permanente para uma entrada senoidal tomando um intervalo de frequência $\omega \in [0, +\infty)$. A visualização desta resposta é dada pelo Diagrama de Bode.

O Diagrama de Bode é constituído de dois gráficos: um gráfico de módulo em decibel – dB – de uma função de transferência senoidal, e outro gráfico do ângulo de fase. Ambos são traçados em relação à frequência e amplitude em escala. A resposta em regime permanente da função de transferência de um sistema pode ser obtida diretamente a partir da função de transferência. [OGATA, 2003] [PHILLIPS, 1996]

A representação padrão do logaritmo do módulo de $G(j\omega)$ é $20 \log|G(j\omega)|$, onde a base do logaritmo é 10. A unidade utilizada nessa representação do módulo é o decibel. [OGATA, 2003] [PHILLIPS, 1996]

Uma função de transferência pode ser representada de modo simples se os dados da resposta em frequência forem apresentados sob a forma de Diagrama de Bode. [OGATA, 2003]

Para a construção do Diagrama de Bode com o Matlab o comando Bode calcula os módulos e ângulo da fase da resposta em frequência de sistemas contínuos, lineares e invariantes no tempo. [OGATA, 2003]

A figura 2.3 mostra um exemplo de um Diagrama de Bode.

Função de Transferência.

$$F(s) = \frac{25}{s^2 + 4s + 25},$$

Onde o Diagrama de Bode,

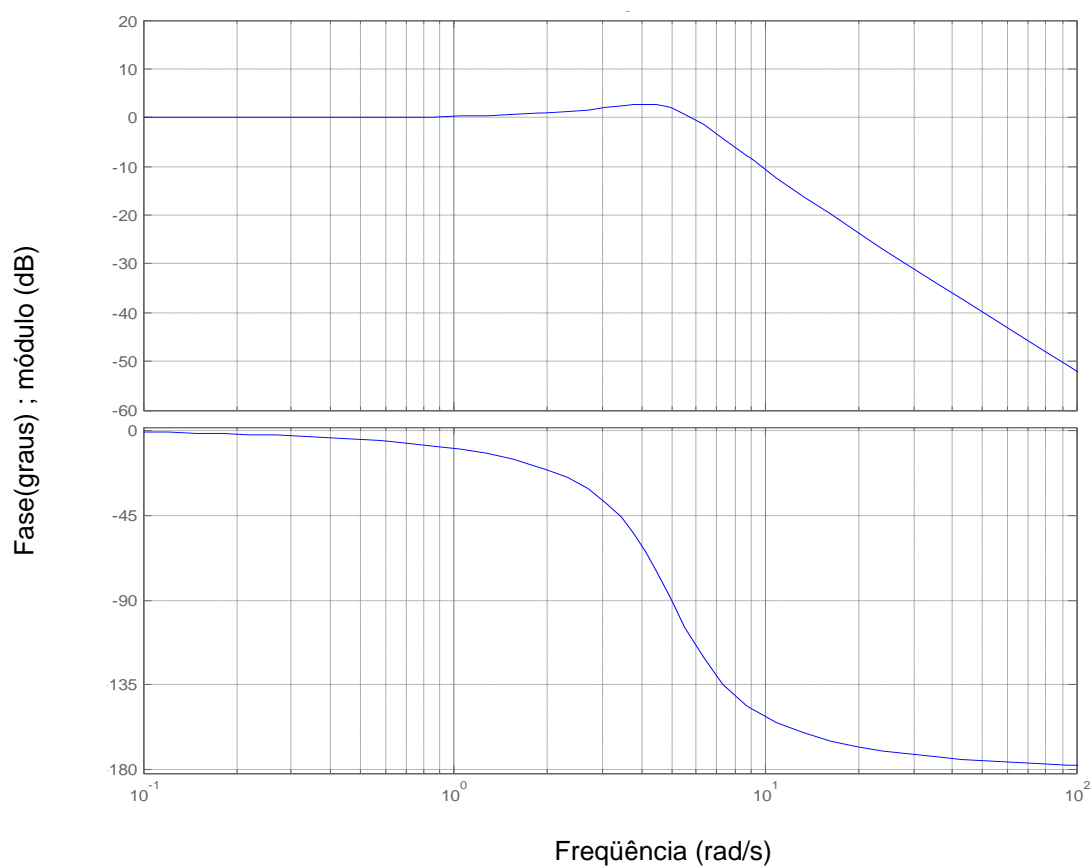


Figura 2.3 – Diagrama de Bode

2.1.6 O problema do controle

A figura 2.4 mostra um sistema de controle com a seguinte descrição:

- $C(s)$ – Sinal de entrada
- $R(s)$ – Sinal de saída
- $G(s)$ – Modelo de um sistema estudado comumente chamado de planta do sistema
- $K(s)$ – Controlador PID
- $H(s)$ – Realimentação do sistema

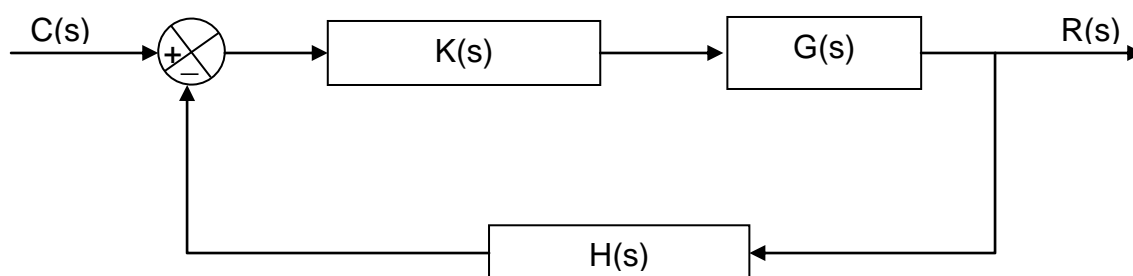


Figura 2.4 – Sistema de controle

O problema básico do controle é achar um controlador $K(s)$ em que dado uma entrada $C(s)$, o sinal de saída $R(s)$ da planta $G(s)$, satisfaça critérios de desempenhos pré-estabelecidos. O controlador $K(s)$ pode ser uma função de transferência de qualquer ordem¹.

2.1.7 Pólos e Zeros

Os pólos de um sistema de malha fechada S as raízes do denominador da função de transferência de malha fechada deste sistema. Enquanto os zeros s as raízes do numerador.

¹ A ordem da função de transferência é dada pelo maior expoente do denominador.

As características do desempenho do sistema dadas pela localização dos pólos no plano s chamado de lugar das raízes. A figura 2.5 apresenta um exemplo ilustrativo:

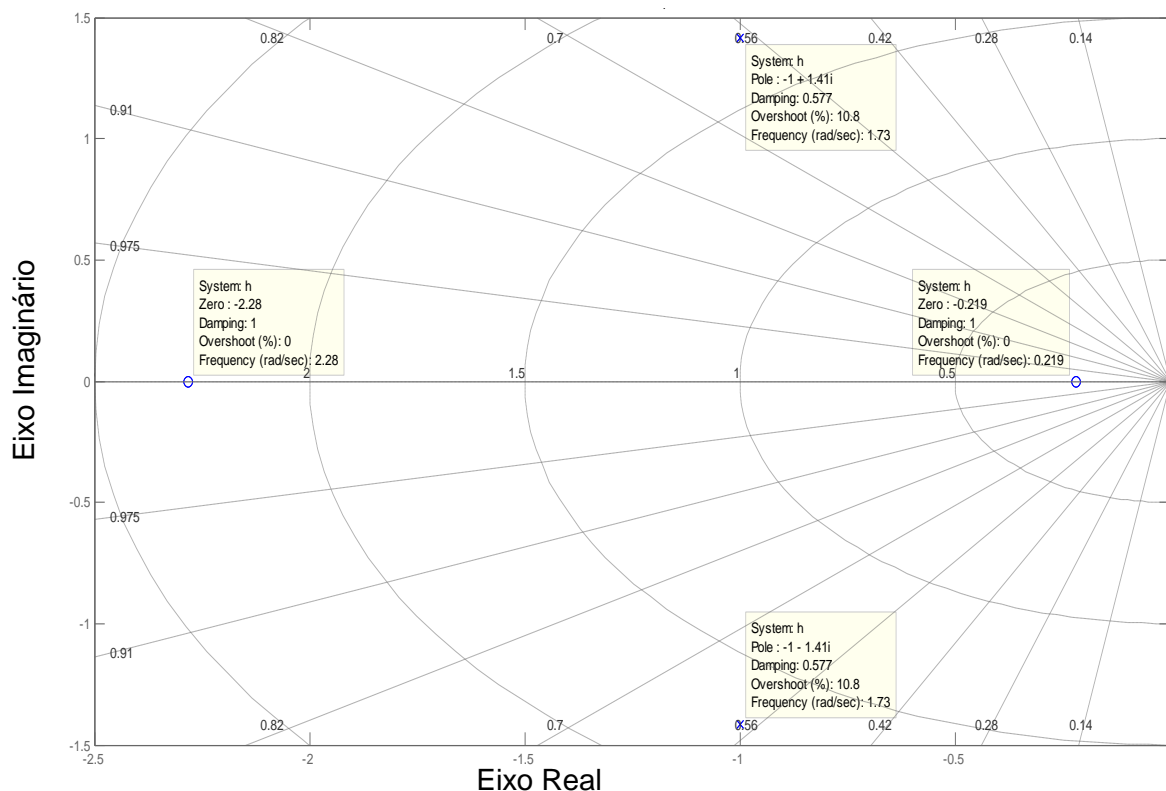


Figura 2.5 – Pólos e Zeros

Para o sistema de malha fechada ser estável todos os pólos devem estar localizados no semi-plano da esquerda.

Para traçar o gráfico do que mostra o zero e o pólo do sistema de malha fechada será utilizado software Matlab com a função `pzmap` (Função de transferência). [OGATA, 2003] [PHILLIPS, 1996]

2.1.8 Norma

Neste trabalho, como restrição de desempenho, é utilizado uma norma de H_∞ que é a diferenciação entre o sistema de malha fechada Real (H_r) e o sistema de malha fechada ideal (H_i). A norma infinita representa o maior ganho de sua resposta em frequência. O principal motivo para utilizar a norma $\|H_r - H_i\|_\infty$ como restrição de desempenho deve-se ao fato de que quanto menor for o valor da norma, melhor é a aproximação da resposta à frequência de H_r em relação a H_i , isso significa que, caso

$\|H_r - H_i\|_\infty$ seja pequena, H_r terá praticamente a mesma resposta de H_i . O método de otimização utilizado será baseado em Algoritmos Genéticos. [JUNIOR, 2004]

2.2 Controlador Proporcional - Integral – Derivativo - PID

O controlador PID é o mais utilizado em sistemas de controle realimentados. Com a utilização de diversas regras de sintonia, ajustes finos no controlador PID podem ser realizados em campo. A utilidade dos controles PID está na sua diversidade de aplicações em sistemas de controle, como por exemplo, controladores PID eletrônicos, hidráulicos e pneumáticos. “Controladores PID são facilmente implementáveis, de baixo custo, robustos e versáteis, com a capacidade de fornecer comportamentos transitórios e de regime permanente satisfatórios para uma grande variedade de processos encontrados na indústria.” [CAMPESTRINI, 2006]

Uma das particularidades desse controlador é que quando não há a possibilidade de uma abordagem analítica para a sua aplicação (situações em que o modelo matemático da planta não é conhecido), é possível a adoção de abordagens experimentais para atingir sua sintonia. [OGATA, 2003]

Como forma de projetar um controlador PID, pode-se projetar um controlador PI para obter uma resposta satisfatória em regime estacionário, e um controlador PD, a fim de melhorar uma resposta transitória. [PHILLIPS, 1996]

A figura 2.6 mostra um modelo de planta no qual é possível aplicar variáveis técnicas de projeto na determinação de parâmetros do controlador que vão impor as especificações do regime transitório e permanente do sistema de malha fechada.

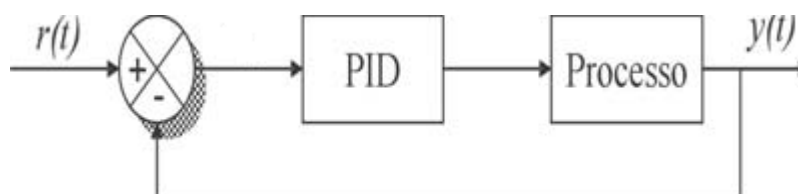


Figura 2.6 – Controlador PID de uma planta

Fonte: [NUNES, 2004]

Sob uma outra ótica, Philips e Harbor [1996] apresentam o controlador PID como uma função do passado, do presente e que prevê o futuro. A composição do controlador pode ser analisada com base nas funções e respostas dadas por seus componentes.

O termo proporcional dá à saída do controlador um componente que é função do estado presente do sistema. Como a saída do integrador depende da entrada para todos os instantes anteriores, este componente da saída do compensador é determinado pelo estado passado do sistema. Esta saída não varia instantaneamente e confere uma inércia ao sistema. A saída do diferenciador é uma função da inclinação de sua entrada e assim pode ser considerada com uma previsão do estado futuro do sistema. Portanto, a parte derivativa do compensador pode acelerar a resposta do sistema pela antecipação do estado futuro. Evidentemente, se a informação da entrada estiver incorreta (ruído), podem ocorrer resultados insatisfatórios nesta previsão.

Pode-se então perceber o termo proporcional como responsável pelo estado presente do sistema, o integrador como responsável por todos os instantes anteriores (passado) e o derivativo como previsão do estado futuro do sistema.

Com o auxílio do Matlab para buscar um conjunto ótimo de valores de parâmetros a fim de satisfazer as especificações temporais. Como por exemplo, ter o Máximo de sobre-sinal na resposta à entrada ao degrau unitário seja menor do que um valor dado e o tempo de acomodação sejam menor que o valor especificado.

Existem vários tipos de controladores PID que são aplicados em sistemas elétricos, hidráulicos e pneumáticos. Com uma abordagem teórica e experimental de sintonia de controladores, a figura 2.7 representa um dos controladores que podem ser elaborados conforme afirma Ogata [2003].

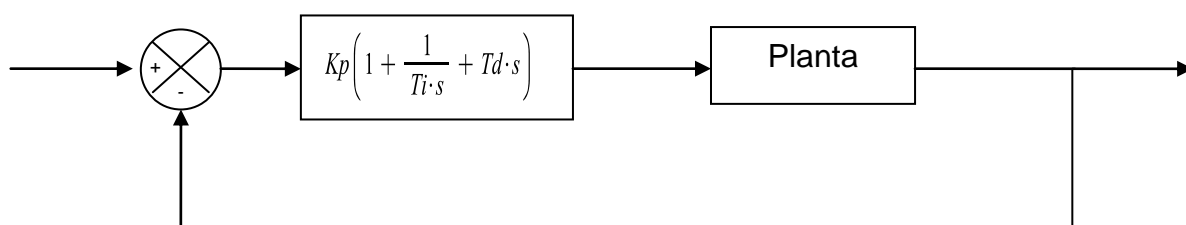


Figura 2.7 – Controlador PID 1 de uma planta.

A figura 2.8 *representa* um modelo de um controlador apresentado por Phillips [1996]. É o mais comum empregado em sistemas de controle de malha fechada e é quase exclusivamente usado nos sistemas de controle industrial.

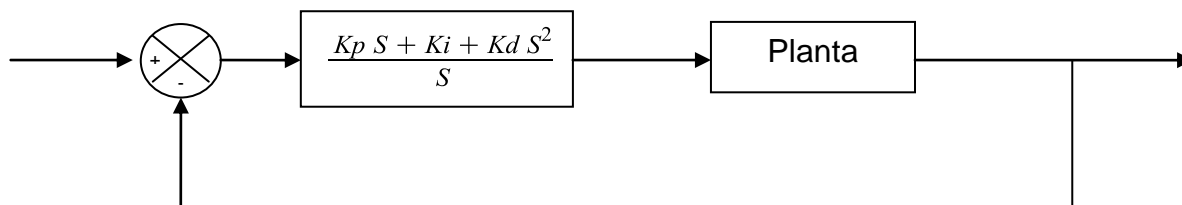


Figura 2.8 – Controlador PID 2 de uma planta

Essa abordagem dos controladores pode ser diretamente aplicada no projeto de sistema de controle de alto desempenho. Portanto, os controladores PID estão na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle.

2.2.1 Controlador P

O controlador P (Proporcional) é um ganho de valor K_p obtido quando ocorre a variação de K para gerar o lugar das raízes de um controlador. “Este controlador é usado em situações em que se pode obter resultado satisfatório para a resposta transitória e um regime estacionário simples pelo ajuste do ganho do sistema, sem necessidade de uma compensação dinâmica.” [PHILLIPS, 1996]

2.2.2 Controlador PI

O controlador PI (Proporcional – Integral) tem a função de aumentar o tipo de sistema em uma unidade e é usado para melhorar a resposta em regime estacionário. O controlador tem um pólo na origem e um no zero. Como o pólo tende a ficar mais próximo da origem que do zero, o controlador é de atraso de fase e adiciona um ângulo negativo ao critério de ângulo do lugar das raízes. Sua utilidade é, portanto, melhorar a resposta em regime estacionário do sistema. [PHILLIPS, 1996]

2.2.3 Controlador PD

Controlador PD (Proporcional – Derivativo) é um tipo de controlador em avanço de fase e melhora a resposta transitória do sistema. Este controlador possui

um ganho crescente com o aumento da freqüência. Se o sinal varia rapidamente em relação ao tempo, ele terá uma grande inclinação.

Os ruídos de alta freqüência serão amplificados por um controlador PD. Portanto, quanto maior a freqüência, maior a amplificação. Como solução para o problema de ruídos de alta freqüência, normalmente acrescenta-se um pólo à função de transferência do controlador PD. O pólo nesse compensador é escolhido com amplitude maior que o zero, de forma que o compensador é ainda em avanço de fase. [PHILLIPS, 1996]

Neste trabalho são utilizados os modelos de controlador PID apresentados nas figuras 2.5 e 2.6.

2.3 Motor de Corrente Contínua

Neste trabalho, o motor de corrente contínua (cc) é a planta $G(s)$ da figura 2.9. O motor cc é um dispositivo atuador de potência que entrega energia a uma carga, como mostra a figura 2.9 (a); um esboço de um motor cc é mostrado na figura 2.9(b); O motor cc converte a energia elétrica de corrente contínua (cc) em energia mecânica rotativa. Uma fração importante do torque gerado no rotor (armadura) está disponível para acionar uma carga externa. [DORF, 2001]

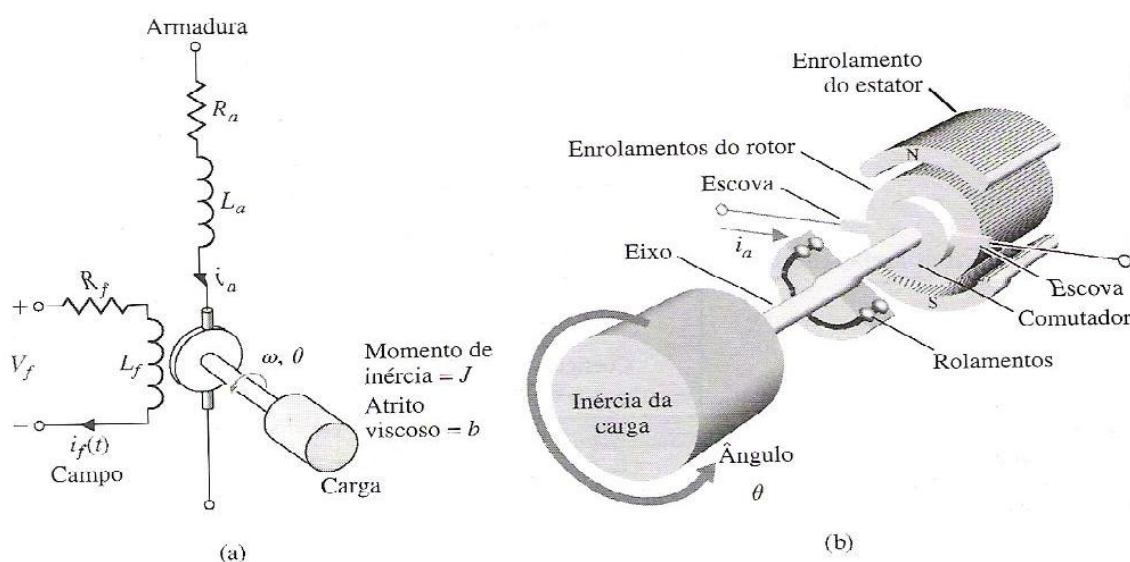


Figura 2.9 – Diagrama de fiação (a) e esboço (b) de um motor CC

Fonte: [DORF, 2001]

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizam-se dois modelos de motor cc:

- Um relacionado à posição do eixo com a tensão de armadura; e
- Relacionado à velocidade do eixo com a tensão de armadura.

A função de transferência do motor com variável de saída posição do seu eixo, temos a seguinte função, a dedução desta função de transferência é apresentado por Bento [1989]:

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{k}{s(R_a \cdot J \cdot s + R_a \cdot f + K \cdot K_b)} \quad (1.1)$$

Onde:

$\theta(s)$ – Posição do eixo

R_a - Resistência de armadura

L_a - Indutância de armadura

K_b - Constante de f.c.e.m

J - Momento de Inércia do rotor

K - Constante de Torque

F - Coeficiente de Atrito

$E_a(s)$ – Tensão de armadura

Para a função de transferência do motor com variável de saída velocidade do seu eixo, temos a seguinte função, apresentada por Mesner e Tilbury (1986):

$$\frac{\theta'(s)}{E_a(s)} = \frac{k}{(J \cdot s + b) \cdot (L \cdot s + R) + K^2} \quad (1.2)$$

Onde:

J - Momento de inércia do rotor

B - razão de amortecimento do sistema mecânico

K - Constante de força eletromotriz

R – Resistência

L - Indutância

$\theta'(s)$ – Velocidade

$E_a(s)$ – Tensão de armadura

2.4 Algoritmos Genéticos – AGs (metodologia de otimização)

2.4.1 Introdução

Os algoritmos genéticos são usados neste trabalho como uma ferramenta matemática de otimização. O uso dos AGs deu-se pela sua capacidade de otimizar problemas lineares e não-lineares. No Matlab existem diversas formas para utilizar os Algoritmos Genéticos. A escolha destas formas de utilização varia de acordo com cada problema (sistema) apresentado. Neste trabalho é utilizado a função nativa que é “ga(parametros)”.

2.4.2 História

No início do século XIX acreditava-se que cada espécie havia sido criada separadamente. O naturalista Carolus Linnaeus realizou o trabalho sobre a classificação biológica de organismos e despertou o interesse pela semelhança entre espécies, acreditando na existência de uma certa relação entre elas. Uma das maiores contribuições para o estudo de desenvolvimento natural teve uma grande participação dos pesquisadores da época, Lamarck, Darwin e Mendel.[JUNIOR, 2004]

Lamarck afirmou que a mudança do ambiente só ocorreria com a evolução e que essa evolução ocorreria gradualmente através de muitas gerações, onde o indivíduo desenvolvia novas habilidades ao tentar se adaptar com este novo ambiente. [JUNIOR, 2004]

Charles Darwin em 1858 apresentou a sua teoria de seleção natural. Segundo Darwin, mutações estão presentes em todas as espécies. A evolução só ocorreria devido à força denominada seleção natural que escolhe os indivíduos mais adaptados ao ambiente. Em um ambiente constante, as espécies não sofriam mutações e suas identidades eram preservadas. Mas, com um ambiente variável, alguns indivíduos serão melhores que os originais e serão preservados originando uma nova espécie. [JUNIOR, 2004]

Gregor Mendel no século XIX apresentou os princípios básicos de herança genética e teve grande influência sobre os futuros trabalhos sobre evolução. Segundo Mendel, uma das características da evolução natural das espécies é o conceito de indivíduos com genes dominantes e recessivos. [JUNIOR, 2004]

A história do Algoritmo Genético se inicia na década de 40, quando os cientistas começaram se inspirar na natureza para criar o ramo de inteligência artificial. No fim da década de 50, as pesquisas se desenvolveram mais para o ramo da pesquisa cognitiva e para a compreensão dos processos de raciocínios e aprendizado. Nesta época começaram a fazer buscas de modelos de sistemas genéricos que pudessem gerar soluções candidatas para problemas que eram difíceis demais para serem resolvidos computacionalmente. [JUNIOR, 2004] [LINDEN, 2008]

Em 1975 Holland publicou seu livro “*Adaptation in Natural and Artificial System*” o qual apresentava seu estudo dos processos evolutivos. O pesquisador Holland apresentou os Algoritmos Genéticos como uma metáfora para os processos evolutivos, de forma que se pudesse estudar a adaptação e a evolução no mundo real simulando dentro de computadores. [JUNIOR, 2004] [LINDEN, 2008]

Com isso, os Algoritmos Genéticos vêm sendo aplicados com sucesso em diversos problemas de otimização e em diversas áreas de aprendizagem de máquinas. A tabela abaixo apresenta a reação entre o processo de evolução e um problema a ser resolvido computacionalmente. [JUNIOR, 2004] [LINDEN, 2008]

Tabela 2.1 – Reação entre o processo de evolução e um problema a ser resolvido computacionalmente	
Evolução Natural	Problema Computacional
Indivíduos	Solução de um problema
População	Conjunto de soluções
Cromossomo	Representação de uma solução
Gene	Parte da representação de uma solução
Cruzamento, Mutação	Operadores de Busca
Seleção natural	Reutilização boas aproximações

Fonte: [JUNIOR, 2004]

Algoritmos Genéticos (AGs) são um ramo dos algoritmos evolucionários² que utiliza método de busca que se baseia em uma metáfora do processo biológico de evolução natural. Os AGs são algoritmos de otimização global, baseados nos

² Algoritmos evolucionários utilizam modelos computacionais dos processos naturais de evolução como uma ferramenta para resolver problemas.

mecanismos de seleção natural e da genética. Sua estratégia é a busca ao reforço de busca de pontos de alta aptidão. Esses pontos nos quais a função objetiva a ser minimizada tem valores baixos. Nos AGs as populações de indivíduos são criadas e submetidas aos operadores de seleção, recombinação e mutação. [JUNIOR, 2004] [LINDEN, 2008]

Os AGs são aplicados em problemas complexos de otimização que tem uma grande variedade de parâmetros ou características que precisam ser combinadas em busca da melhor solução, com muitas restrições ou condições que não podem ser representadas matematicamente, com grandes espaços de busca. [JUNIOR, 2004] [LINDEN, 2008]

2.4.3 Inicialização da população

A população inicial é gerada aleatoriamente e o tamanho dela depende do número de indivíduos dado pelo projetista. A lei das probabilidades sugere que teremos uma distribuição que cobre praticamente todo o espaço de soluções. Mas isso não poderá ser garantido, pois a população tem tamanho finito. A população gerada é representada por números binários. [JUNIOR, 2004] [LINDEN, 2008]

2.4.4 Função de avaliação

A função de avaliação é utilizada para determinar a qualidade de um indivíduo como uma solução do problema em questão. A função de avaliação é o elo entre o AG e o mundo externo. A avaliação é realizada para representar da melhor forma o problema e tem por objetivo fornecer uma medida de aptidão de cada indivíduo. [JUNIOR, 2004] [LINDEN, 2008]

2.4.5 Seleção

O método de seleção de pais deve simular o mecanismo de seleção natural que atua sobre as espécies biológicas, em que os melhores pais são capazes de gerar mais filhos, ao mesmo tempo em que os pais menos aptos também podem gerar descendentes. Conseqüentemente, não serão desprezados os indivíduos com a função de avaliação extremamente baixa, mas temos que privilegiar os indivíduos com a função de avaliação alta. Esta decisão é razoável, pois até os indivíduos com

péssima avaliação podem ter características genéticas capazes de gerar indivíduos que sejam a melhor solução para o problema a que se está procurando a solução, características estas que podem não estar presentes em nenhum outro cromossomo de nossa população. [JUNIOR, 2004] [LINDEN, 2008]

2.4.5.1 Seleção por roleta

O método mais utilizado na seleção é a roleta de seleção. Neste método procura-se um nível de adequação que é utilizado para associar uma probabilidade de seleção a cada indivíduo. Com isso os indivíduos com alta adequação terão maior probabilidade de serem escolhidos, e assim, com uma pequena chance de serem eliminados. Uma das vantagens desse tipo de seleção é permitir que mesmo os indivíduos com menor adequação tenham uma pequena chance de participar do processo de reprodução. Com isso, poderão garantir a diversidade das gerações futuras. [JUNIOR, 2004] [LINDEN, 2008][LEMOS, 2008]

2.4.6 Reprodução

Após a seleção do melhor indivíduo será gerado um novo conjunto de indivíduos através de cruzamento e mutação. A cada par de indivíduos “pai” será gerado um novo indivíduo que compartilha as características dos pais. Este processo dará origem a uma nova geração, com uma maior adequação que a geração anterior. [JUNIOR, 2004] [LINDEN, 2008][LEMOS, 2008]

2.4.7 Cruzamento

Os indivíduos selecionados são cruzados da seguinte forma: a lista de indivíduos selecionados é embaralhada aleatoriamente. Com isso será criada uma segunda lista, chamada de parceiros. Cada indivíduo selecionado é então cruzado com o indivíduo que ocupa a mesma posição na lista de parceiros. A figura 2.10 mostra como ocorre.

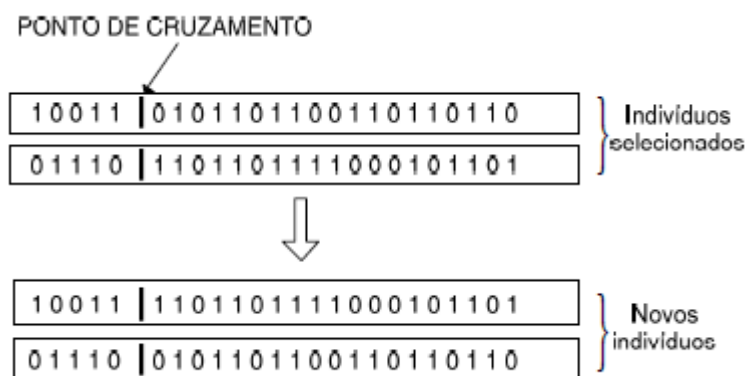


Figura 2.10 – Cruzamento de dois indivíduos

Fonte: [JUNIOR, 2004]

Uma informação importante a ser fornecida pelo projetista é a chamada probabilidade de cruzamento, probabilidade em que os indivíduos selecionados efetuam o cruzamento. Quanto maior for a taxa de cruzamento, maior a probabilidade de cruzamento e mais rápido novas estruturas serão introduzidas na população. Algumas delimitações são importantes se essa probabilidade for muito alta. Estruturas com boas aptidões poderão ser perdidas e com o valor muito baixo, o algoritmo pode necessitar de várias gerações até convergir. Mas grande maioria da literatura afirma que a faixa de cruzamento é em torno de 60% a 70%. [JUNIOR, 2004] [LEMOS, 2008]

2.4.8 Mutação

A operação de mutação garante maior aproveitamento do espaço de estados. Para ajudar a resolver os mínimos ou máximos locais após a criação de uma nova geração, os bits sofrem alteração aleatória. Na mutação, os valores são alterados em um gene de um indivíduo sorteado aleatoriamente com uma determinada probabilidade, denominada probabilidade de mutação. Portanto, vários indivíduos da nova população podem ter seus genes alterados aleatoriamente. A figura 2.11 mostra a operação de mutação. [JUNIOR, 2004] [LEMOS, 2008]

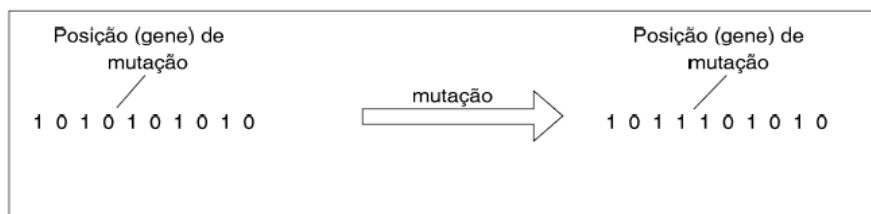


Figura 2.11 – Operação de mutação

Fonte: [JUNIOR, 2004]

A probabilidade de mutação é fornecida pelo projetista, e tem por objetivo a probabilidade com que um gene de cada cromossomo sofre mutação. Uma probabilidade baixa de mutação previne que uma dada posição fique parada em um valor. Com a probabilidade muito alta, a busca se torna muito aleatória. Na maioria da literatura os valores que são fornecidos estão entre 0,1% a 5%. [JUNIOR, 2004] [LEMO, 2008]

2.4.9 Funcionamento dos Algoritmos Genéticos

A figura abaixo representa o funcionamento de um Algoritmo Genético simples. Os fundamentos matemáticos, como um teorema fundamental dos Algoritmos Genéticos, podem ser encontrados em Holland [1992]. [JUNIOR, 2004]

O AG é uma técnica de busca, onde o seu objetivo é chegar a um determinado estado onde certa condição é satisfeita. Esse estado é uma especificação de certos aspectos da realidade que são importantes para o problema.

As diferentes ações causam modificações no estado do sistema. As várias ações podem ser avaliadas com um caminho da busca, com o objetivo de encontrar o estado final desejado. Portanto, para resolver um problema, a solução é buscar o estado em que uma determinada solução seja satisfatória. Seria receber um problema de entrada e retornar uma solução sob a forma de uma seqüência de ações que sejam determinadas para atingir o objetivo desejado. Para o funcionamento do Algoritmo Genético segue os passos conforme está no fluxograma da figura 2.12:

- 1- Inicialização da População
- 2- Avaliação (A solução foi encontrada?)
 - a. Caso seja verdadeiro
 - i. Finaliza o fluxo
 - b. Caso contrário
 - i. Seleção
 - ii. Cruzamento
 - iii. Mutação
 - iv. Reprodução

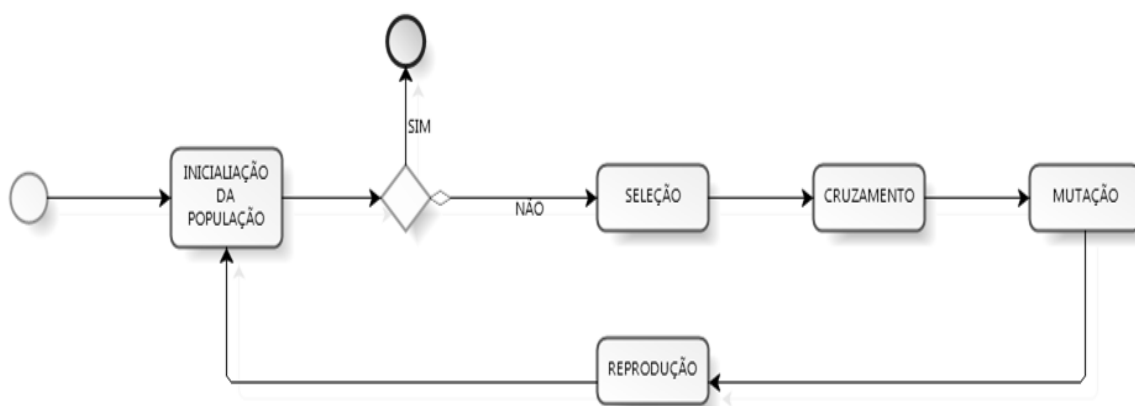


Figura 2.12 – Passos para o funcionamento do algoritmo genético

Fonte: [JUNIOR, 2004]

O critério de parada mais comum é pela limitação do número de gerações ou por um erro abaixo de um valor especificado pelo projetista para um determinado parâmetro do problema.

2.4.10 Vantagens e Desvantagens dos Algoritmos Genéticos

a) Vantagens

Segundo Castro [2005], os AGs tem sido empregados em problemas complicados de otimização em que muitas vezes outros métodos não resolvem. Algumas vantagens dos AGs observadas podem ser:

- Realizam várias buscas simultâneas em várias regiões do espaço de busca;
- Trabalham com uma população e não com um ponto único;

- Otimizam um grande número de variáveis;
- Otimizam parâmetros de funções objetivas com superfícies complexas e complicadas reduzindo a incidência de mínimos locais;
- Não são totalmente aleatórios: existem métodos que usam apenas variáveis aleatórias para realizar sua pesquisa. Existem componentes aleatórios que usam informação da população corrente para determinar o próximo estado de busca;
- Funcionam tanto com parâmetros contínuos como discretos ou com sua combinação;
- Geram uma lista de parâmetros ótimos e não uma simples solução;
- Apresentam um bom desempenho para a maioria dos problemas.

b) Desvantagens

Segundo Castro [2005], são desvantagens dos AGs :

- São lentos para achar o ótimo global exato;
- Na configuração existem várias possibilidades de configurações das variáveis e um grande número de combinações a serem investigadas;
- Devido ao grande número de variáveis que um AG trata, às populações elevadas e ao alto número de gerações para a cobertura de espaço de soluções, os AGs possuem um custo de processamento computacional elevado.

CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO DAS SIMULAÇÕES

3.1 Conceitos iniciais

Há várias técnicas para ajustar um controlador PID, e uma dessas técnicas é o Algoritmo Genético. O Algoritmo busca fornecer os melhores parâmetros. Para fornecer os melhores indivíduos é preciso configurar os parâmetros do Algoritmo Genético que são de grande importância na busca.

O sistema é composto por controlador PID, motor de corrente contínua e uma realimentação. O sistema é de malha fechada e serão realizados testes com objetivo de fornecer um sinal de entrada que seja igual ao sinal de saída.

Haverá uma norma – sendo esta a diferença entre o Sistema Real do Sistema Ideal – que servirá de restrição de desempenho, em que quanto menor o valor da norma, o sistema ajustado terá praticamente a mesma resposta.

3.2 Razão do uso da tecnologia escolhida

O Matlab é uma linguagem poderosa em termos de computação técnica. A sua característica é ser sutil em cálculos matemáticos, modelagem e simulações, análise numérica e processamentos, visualização e gráficos e no desenvolvimento.

Em seu pacote padrão possui ferramentas (funções) comuns a diversas áreas do conhecimento, dentre elas está uma função do Algoritmo Genético. Assim, é necessário apenas configurar os parâmetros e utilizá-los.

3.3 Ajustando os parâmetros do Algoritmo genético

A importância de ajustar os parâmetros do Algoritmo Genético está em seu desempenho. A escolha desses parâmetros influencia em um dos aspectos mais relevantes dentro da estratégia de configuração. Na procura de um melhor desempenho foram obtidos os parâmetros do controle do Algoritmo Genético do Matlab conforme mostra a tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros do Controlador no Matlab

Função do Matlab	Valor
Tamanho da população –PopulationSize	10.000
Cruzamento- CrossoverFraction	0.7
Mutação – MigrationFraction	0.04
Avaliação – SelectionFcn	Roleta - selectionroulette

O ajuste de restrições de parada é importante para ter os melhores parâmetros do controlador PID (indivíduos). O parâmetro StallGenLimit é a quantidade de gerações que o Algoritmo tem para parar caso não houver melhora na função o valor foi ajustado para 100. O parâmetro StallTimeLimit é o tempo que o algoritmo tem para parar se não houver melhora na função objetiva o valor foi 4500.

Para a busca foi definida uma função objetiva em que se estabeleceu o estado onde certa condição é satisfeita. Uma das preocupações foi encontrar indivíduos que satisfazem a condição de estar à esquerda do eixo y, onde a função de transferência do sistema real é estável.

O método para avaliar aptidão dos indivíduos gerados foi o método da roleta, onde aos indivíduos que teriam mais aptidão, é dada uma porção maior na roleta, e aos indivíduos com baixa aptidão, é dada uma menor porção. Com isso, pode-se garantir que são gerados indivíduos com qualidade para a solução do problema.

3.4 Planta do controlador PID

Os controladores PID são facilmente implementados, de baixo custo, robustos e versáteis, com a capacidade de fornecer comportamentos transitórios e de regime permanente satisfatórios, para uma grande variedade de processos encontrados na indústria.

Com o avanço tecnológico, estudos vêm sendo empregados para sintonizar esses reguladores de maneira automática, a fim de aumentar a produtividade do processo. Com a necessidade de sintonia dos controladores, calcula parâmetros baseados em características do processo.

Um controlador PID atuando em malha fechada, tem a responsabilidade de gerar um sinal de controle $u(t)$ que seja capaz de corrigir a diferença entre o sinal de referência $r(t)$ e o sinal de saída $y(t)$ do processo que está controlando.

A representação do controlador pela função de transferência é dada pela seguinte função:

$$C(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad (1.1)$$

Onde:

K_p = proporcional

T_i = integral

T_d = derivativo

Para representar a função de transferência, a figura 3.1 mostra o diagrama de blocos demonstra o efeito de cada bloco do controlador. Este controlador é chamado de controlador não-interativo, pelo fato de que o tempo integral T_i não interfere na parte derivativa; e o tempo derivativo T_d não interfere na parte integral.

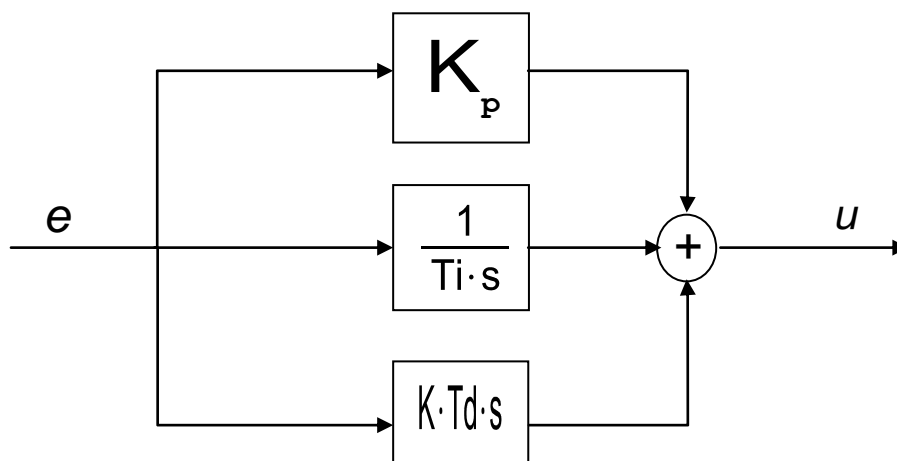


Figura 3.1 – Diagrama de blocos de um controlador PID 1 não-interativo

Simplificando a função de transferência (1.1) para criar uma função no

Matlab $C(s) = K \left(\frac{T_i s + 1 + T_d s^2 T_i}{T_i s} \right)$, para o numerador foi criado um vetor num1=[(Ti*Td*Kp) (Td*Kp) Kp] para o denominador den1=[0 Ti 0].

A forma de implementar o controlador determina as características de estabilidade e a natureza da resposta transitória do sistema de controle. A figura 3.2, mostra outra forma de implementar um controlador PID:

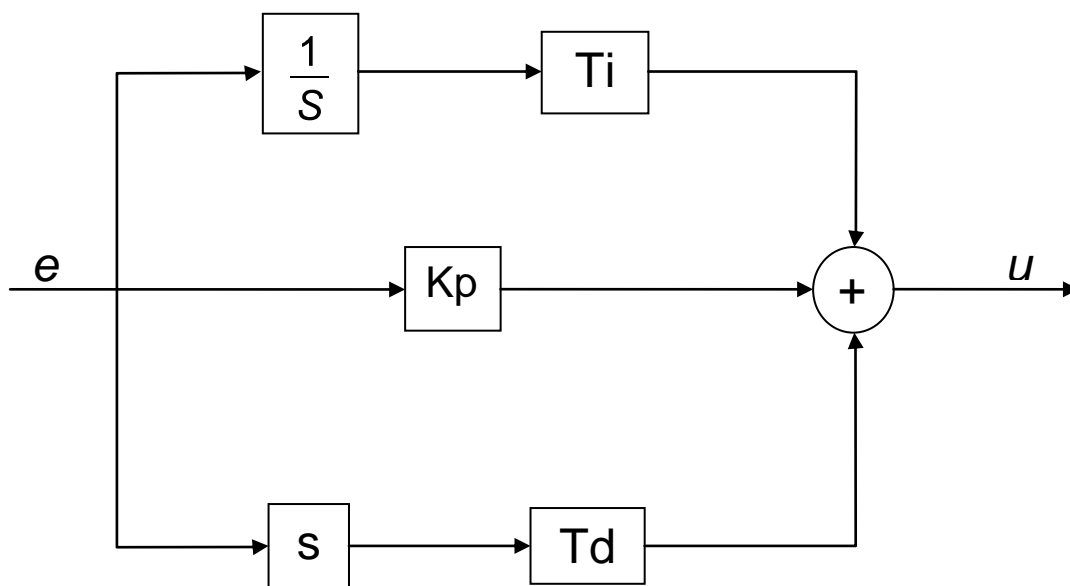


Figura 3.2 – Diagrama de blocos de um controlador PID 2 não-interativo

Fonte: [PHILIPS,1996]

A representação da função de transferência do diagrama acima é

$$C(s) = K_p + \frac{T_i}{s} + T_d \cdot s$$

Simplificando a função tem-se:

$$C(s) = \frac{K_p s + T_i + T_d s^2}{s} \quad (1.2)$$

Para implementação no Matlab será determinado o numerador num1=[Td Kp Ti] e o denominador. den1= [0 1 0].

Cada controlador deve ser sintonizado de acordo com o processo que irá controlar. Assim, a sintonia dos controladores é fundamentada em algum conhecimento do processo que pode ser de apenas algumas características elementares do processo ou o modelo completo do mesmo. O importante é que quanto mais informações se tem do sistema, melhor será a sintonia do controlador.

3.5 Planta do Motor de Corrente Contínua

Para o motor de corrente contínua a energia elétrica é convertida em energia mecânica. O motor de corrente contínua é controlado por armadura, possui como entrada um par de fios chamado de armadura, onde é aplicada uma tensão contínua

para que o motor se movimente. O movimento do motor é a variável de saída tanto quanto a posição do eixo do motor, quanto à velocidade do mesmo.

Serão definidas duas funções de transferência no estudo dos motores de corrente contínua, uma relacionando a posição do eixo em relação à tensão aplicada nos terminais de armadura de entrada, e outra relacionando a velocidade do eixo com a tensão aplicada, de maneira a relacionar a velocidade do eixo à tensão aplicada.

Em (2.1), apresenta-se a função de transferência do motor de corrente contínua, onde a posição do eixo é relacionada à tensão aplicada tem-se:

$$F\theta(s) = \frac{K}{s \cdot (Ra \cdot J \cdot s + Ra \cdot f + K \cdot Kb)} \quad (2.1)$$

Onde:

Ra - Resistência de armadura $Ra=12.6 \, \Omega$;

La - Indutância de armadura $La = 14.3 \, \text{mH}$;

Kb - Constante de f.c.e.m $kb = 9.78 \cdot 10^{-2} \, \text{V.s}$;

J - Momento de Inércia do rotor $J = 156 \cdot 10^{-6} \, \text{Kg.m}^2$;

K - Constante de Torque $k = 9.78 \cdot 10^{-2} \, \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$;

f - Coeficiente de Atrito $f= 25 \cdot 10^{-6} \, \text{W.s}^2$;

Para a função de transferência do motor, foi criada uma função no Matlab, definindo um numerador $\text{num2}=[0 \, 0 \, k]$ e o denominador $\text{den2}=[(Ra \cdot J) ((Ra \cdot f)+(k \cdot kb)) \, 0]$.

Para um motor de corrente contínua que relaciona a velocidade do eixo à tensão aplicada, em (2.2), tem-se a seguinte função de transferência:

$$V(s) = \frac{K}{(J \cdot s + b)(L \cdot s + R) + K^2} \quad (2.2)$$

Onde:

J - Momento de inércia do rotor $J=0.1 \, \text{Kg.m}^2/\text{s}^2$

b - Razão de amortecimento do sistema mecânico $b=0.9 \, \text{Ns/m}$;

K - Constante de força eletromotriz ($K = Ke = Kt$) $= 0.01 \, \text{Nm/Amp}$;

R - Resistência $R=5 \, \Omega$;

L - Indutância $L=0.9 \, \text{H}$;

Para a função de transferência ser implementada em uma função do Matlab foi determinando um numerador $\text{num2}=[0 \, 0 \, K]$ e um denominador $\text{den2}=[(J \cdot L) ((J \cdot R)+(b \cdot L)) (b \cdot R)] + (K^2)]$.

3.6 Planta da Realimentação

Em um sistema de malha fechada o qual possui uma relação de comparação entre a saída e a entrada de referência, a realimentação tem como sua principal função evitar perturbações externas e insensíveis. Para o Sistema Real foi definida uma realimentação unitária onde foi implementado no Matlab um numerador $\text{num3} = [0 \ 0 \ 1]$ e um denominador $\text{den3} = [0 \ 0 \ 1]$.

3.7 Arquitetura do Sistema Real

Na análise do sistema de controle, precisa-se calcular as funções de transferências em cascata, as funções de transferências conectadas em paralelo e as funções de transferência com realimentação, conectadas (de malha fechada). Para obter a função de transferência do sistema Real temos a seguinte arquitetura. A figura 3.3 mostra o diagrama de blocos.

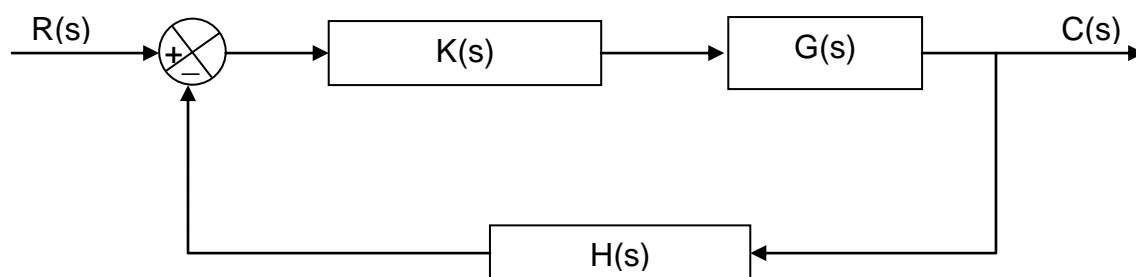


Figura 3.3 – Diagrama de Blocos

A figura 3.4, mostra que $K(s)$ e $G(s)$ estão em série,

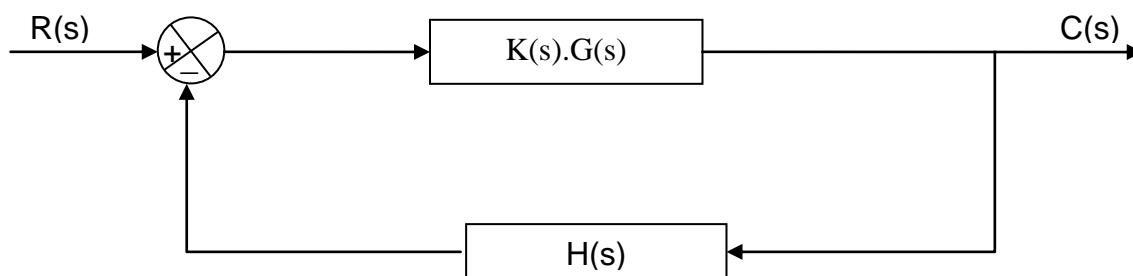


Figura 3.4 – Diagrama de Blocos em série

A figura 3.5, mostra que $K(s)$ e $G(s)$ estão em paralelo com $H(s)$. A função de transferência é

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K(s) \cdot G(s)}{1 - G(s) \cdot K(s) \cdot H(s)} \quad C(s)$$

Figura 3.5 – Função de Transferência

Para o sistema real foi definido um controlador PID, um motor de corrente contínua e uma realimentação. Para isso foi definido um modelo teórico como segue na figura 3.6.

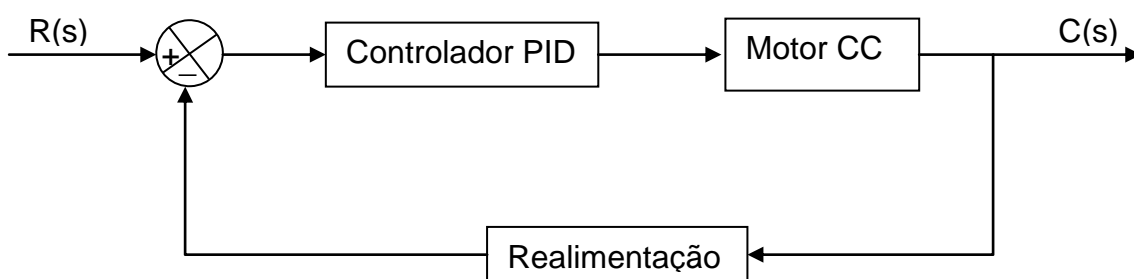


Figura 3.6 – Diagrama do modelo teórico

Os sinais de entrada de teste geralmente utilizados são as funções degrau, rampa, parábola de aceleração, impulso senoidais e outra. Com os sinais de teste pode-se obter facilmente uma análise experimental e matemática dos sistemas de controle, uma vez que esses sinais são funções de tempo muito simples. Com isso, pode-se determinar quais desses sinais típicos de entrada devem ser utilizados de acordo com as características do sistema pelo comportamento da entrada a que o sistema será submetido com maior frequência, sob condições normais de operações.

A representação gráfica das curvas de resposta em função do tempo dos sistemas de ordem superior é feita por meio de simulação pelo computador. Para a análise da resposta transitória é utilizada uma função nativa do Matlab - `step(numerador, denominador);`

3.8 Planta Ideal

Para o sistema malha fechada Ideal de primeira ordem a relação de entrada-saída é dada por:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{T \cdot s + 1} \quad (3.1)$$

Na representação do sistema ideal, para a constante de tempo T , quanto menor o valor, mais rapidamente o sistema responde.

Para a implementação no Matlab foi criada uma função onde o numerador $\text{num} = [0 \ 0 \ 1]$ e um denominador $\text{den} = [0 \ T \ 1]$.

Serão utilizados dois sistemas ideais.

- Sistema Ideal 1

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{s + 1} \quad (1.1)$$

Onde a constante de tempo é igual 1. O gráfico 3.1 mostra a seguinte resposta ao degrau unitário.

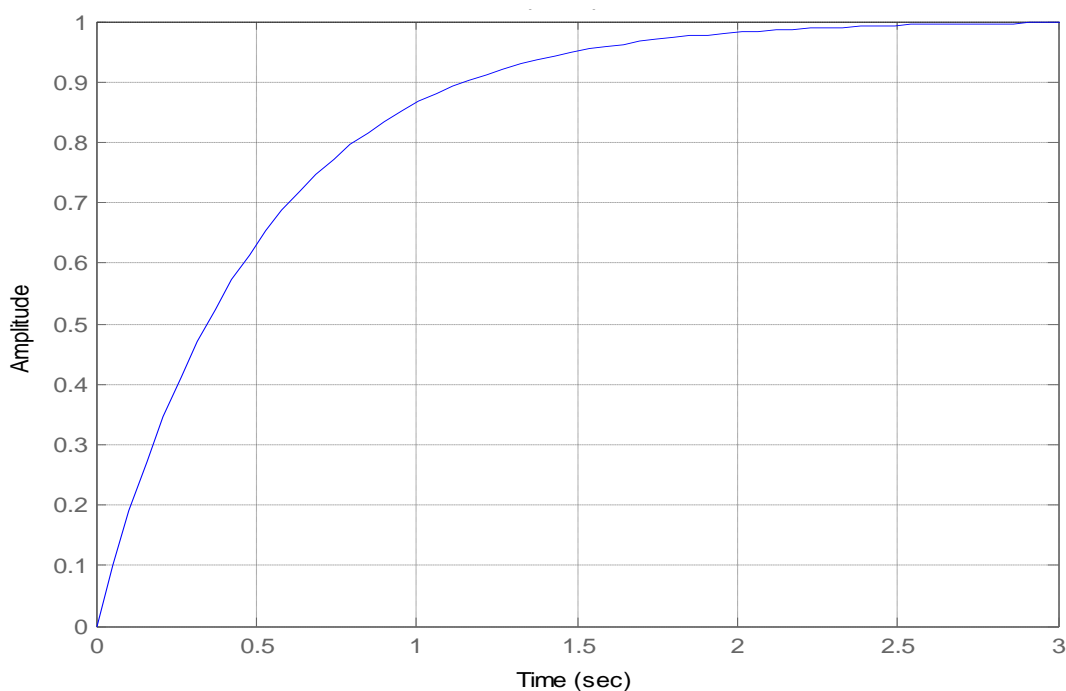


- Sistema Ideal 2

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{0.5 \cdot s + 1} \quad (1.2)$$

Onde a constante de tempo é igual a 0.5. O gráfico 3.2 mostra a seguinte resposta ao degrau unitário.

Gráfico 3.2 - Curvas de Resposta ao degrau unitário – Sistema Ideal 2



3.9 Problemas e Soluções encontrados

A figura – 3.7 mostra o modelo de fluxo para ajustar o controlador que será utilizado dividido nas seguintes etapas:

- Para o Sistema Real: nesta etapa são definidos os componentes do sistema de malha fechada. São eles: controlador PID, motor de corrente contínua e realimentação.
- Para o Sistema Ideal: uma função de transferência de primeira ordem. Nesta etapa onde é definida a resposta que se está procurando para o sistema real. Na prática, entretanto, é razoável que o tempo estimado da resposta seja o intervalo de tempo necessário para a curva alcançar e

permanecer a 2% da linha do valor final, e que é de quatro constantes de tempo. Para o sistema deve definir de acordo com a função (3.1)

- **Função Objetiva:** é a maneira utilizada pelos AGs para determinar a qualidade de um individuo como solução do problema. Nesta fase é definido que o pólo da função de transferência do Sistema real está à esquerda do eixo Y.
- **Função para Otimizar:** nesta fase é definido o mínimo e o máximo das funções. Começa o ajuste do Sistema Real e, como saída, será apresentado o Diagrama de Bode e o gráfico de resposta ao tempo.
- **Requisito de Desempenho:** onde são definidos os parâmetros do Algoritmo Genético. Nesta fase é definido o tamanho da população, cruzamento, mutação e avaliação. Para avaliação dos parâmetros é utilizado o método da roleta definido na seção 3.3.
- **Etapa de análise de restrições:** o pólo da função deve estar à esquerda do eixo y. A quantidade de gerações foi definida pelo projetista em 500. Na procura da melhor sintonia do controlador PID com as características do Sistema Ideal tem-se os seguintes parâmetros: a função objetiva pode ter no mínimo 0 e no máximo 60.000 o valor foi definido pelo projetista.
- **Na etapa de reprodução de indivíduos,** o parâmetro que foi ajustado no Algoritmo Genético é a quantidade de gerações repetidas que aumentou a tolerância para 100 e o tempo que os indivíduos podem reproduzir para 4500 segundos.
- **Seleção dos indivíduos** nesta etapa onde escolhe o melhor indivíduo entre a população. O melhor indivíduo são os parâmetros do controlador PID que atende todas as restrições.

Com objetivo de apresentar exemplos didáticos que permitam a visualização do espaço de parâmetros no plano, e que possam ser utilizados em estudos comparativos, procurou-se ajustar os parâmetros de um modelo de um Sistema Real (teórico) da seguinte forma.

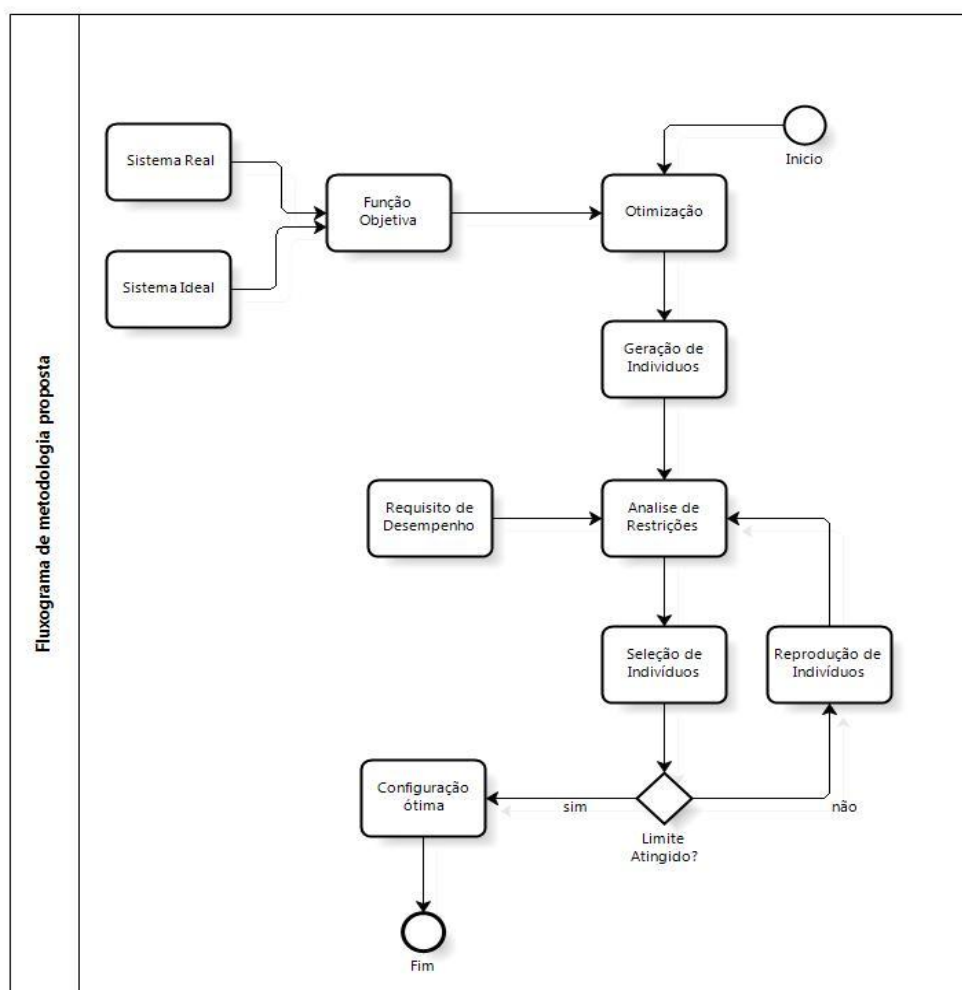


Figura 3.7 – Fluxograma de metodologia proposta

3.10 Modelos

Para o estudo de um Sistema Real, o qual permite obter uma arquitetura composta por um controlador PID, um motor de corrente contínua e uma realimentação, conforme apresentado na seção 3.7, serão apresentados a seguir quatro modelos que utilizam como parâmetros de otimização três sistemas ideais. Nos primeiros dois modelos, será utilizado um motor de corrente contínua que relaciona a velocidade do eixo pela tensão e um controlador PID. Nos outros dois modelos, será utilizado um motor de corrente contínua que relaciona a posição do eixo em relação à tensão e um controlador PID. Será apresentado oito simulações.

3.10.1 Simulação 1

Para a primeira simulação o sistema real é composto pelo controlador PID da função (1.1) e o motor CC da função 1.1. Para o sistema ideal 1 da função 1.1 apresentado na seção 3.8, onde a constante de tempo é igual a 1 segundo. A figura 3.8 mostra a simulação.

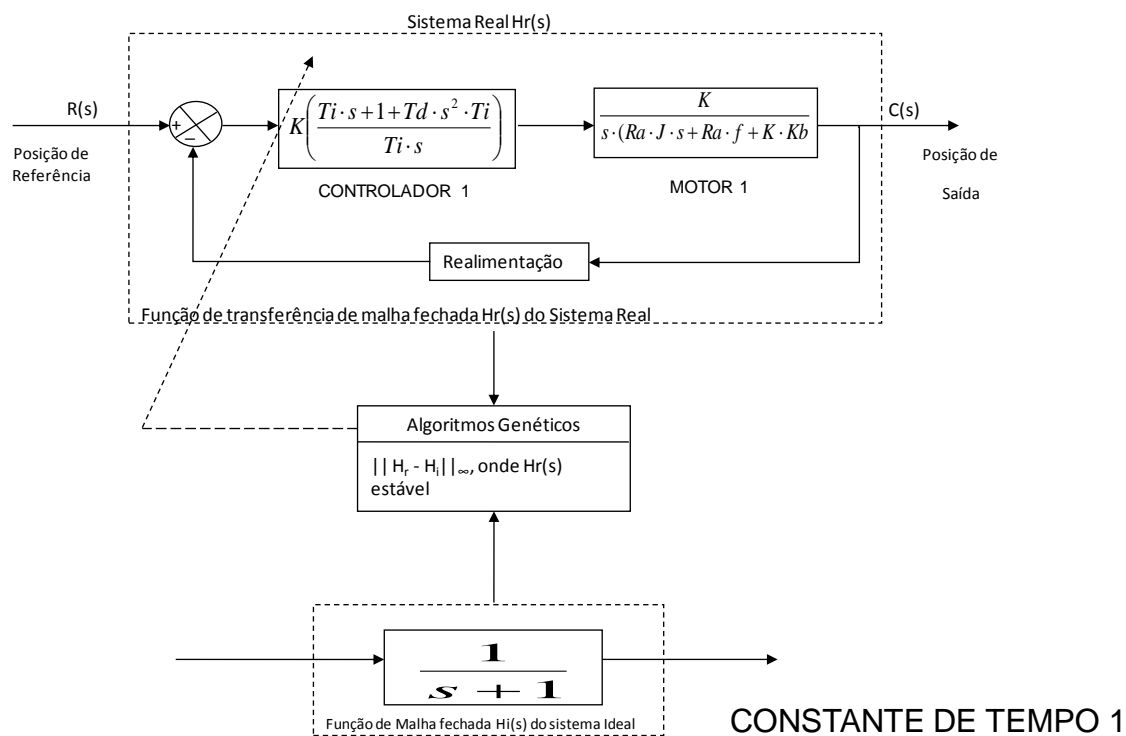
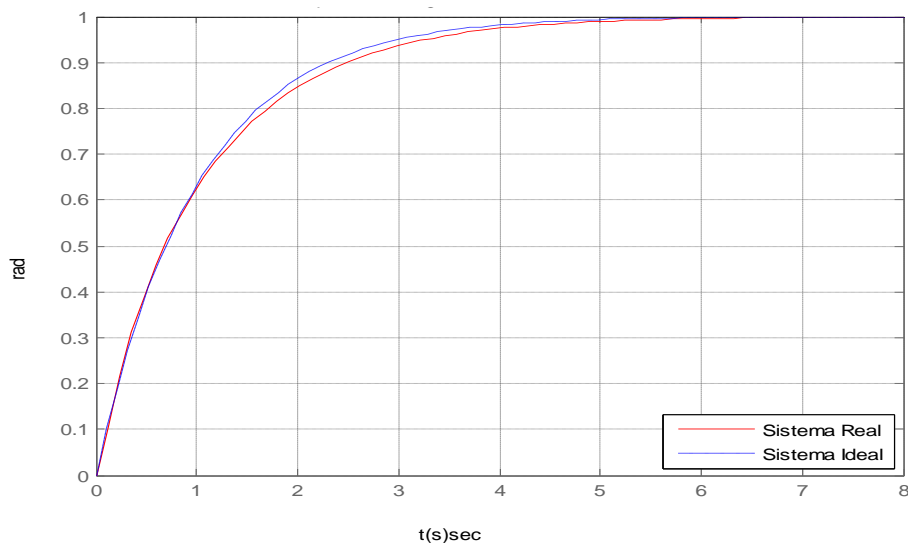


Figura 3.8 – Simulação 1 – Ajuste do controlador PID

A entrada do sistema real é unitária onde $R(s) = 1$. Como respostas da otimização do controlador é encontrado os seguintes valores dos parâmetros $K_p = 16.712$, $T_i = 0.039$, $T_d = 0.342$. Para isso temos a seguinte representação gráfica para curva de resposta conforme mostra o gráfico 3.3:

Gráfico 3.3 – Curvas de resposta ao degrau unitário- Sistema ideal e Sistema Real – Simulação 1

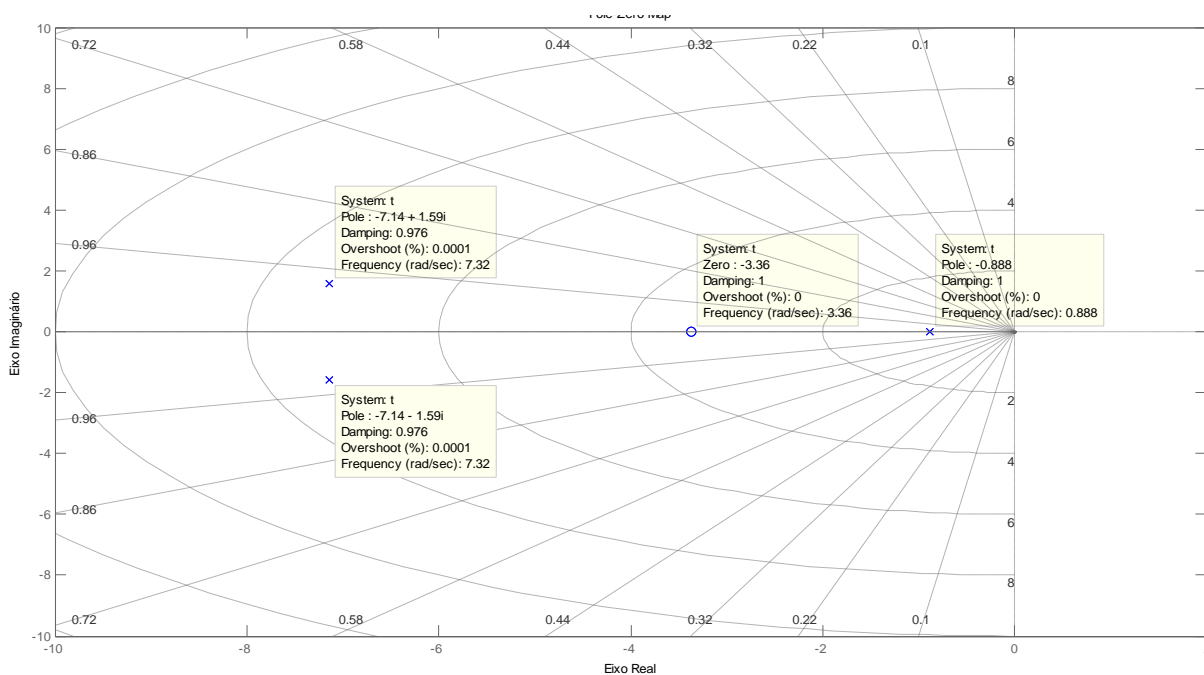


A função de transferência do sistema real é dada:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0.002229 \cdot s^2 + 0.05716 \cdot s + 0.1671}{0.003514 \cdot s^3 + 0.05332 \cdot s^2 + 0.2327 \cdot s + 0.1671} \quad (1)$$

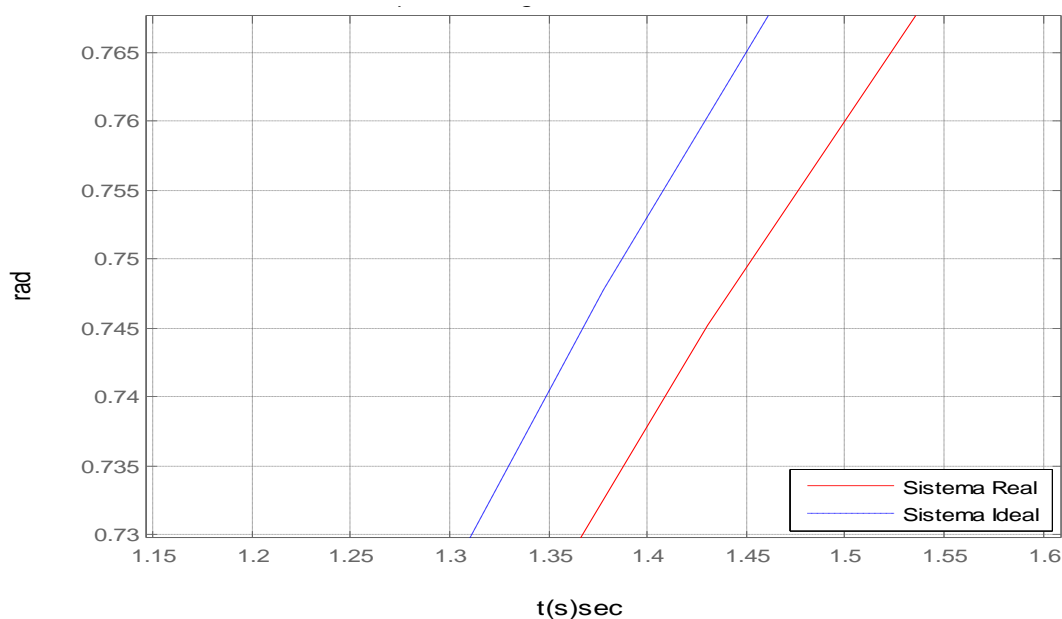
O gráfico 3.4 mostra os pólos e zeros, onde o sistema é estável, pois todos os pólos estão situados à esquerda do semiplano do plano s.

Gráfico 3.4 – Zeros e Pólos – Simulação 1

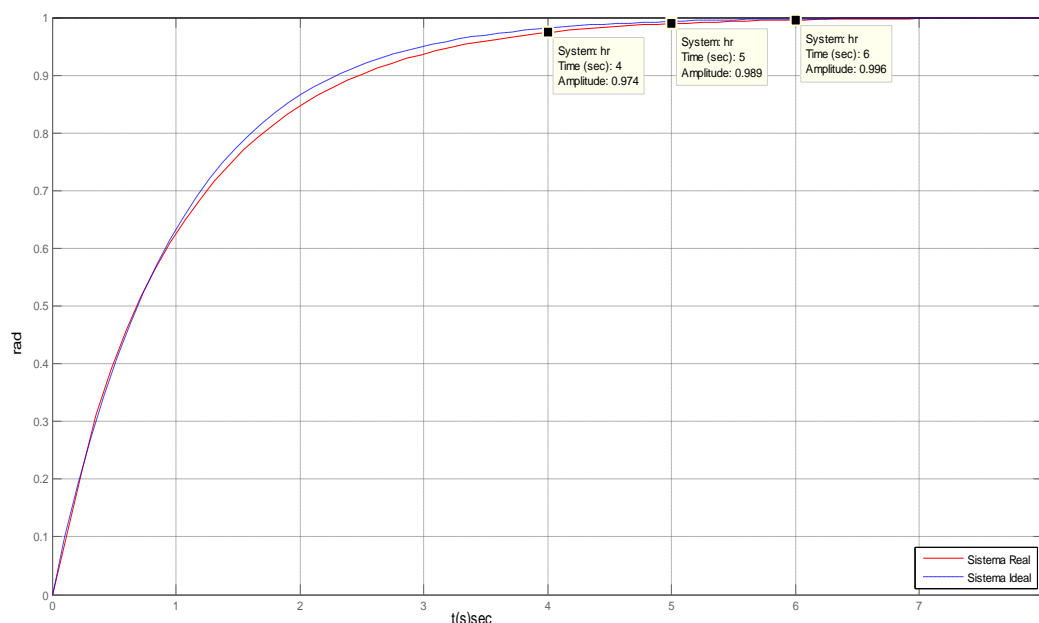


Para mostrar a diferença de aproximação entre o sistema real e o sistema ideal, onde a sintonia do controlador foi satisfatória. Fazendo uma aproximação no gráfico 3.5 para mostrar a semelhança entre os sistemas. O gráfico 3.5 mostra a diferença entre os sistemas. A norma encontrada é igual a 0.029

Gráfico 3.5 – Sintonia satisfatória – Simulação 1

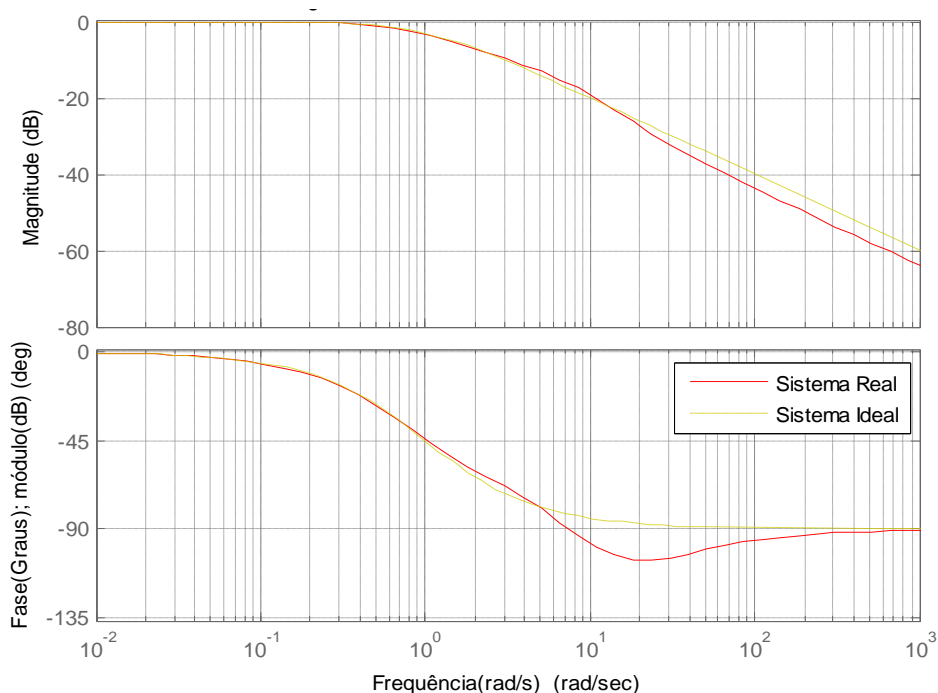


O tempo médio para a otimização da simulação é de 257 minutos. Para determinando o conjunto de valores de parametros do controlador PID, pode – se fazer uma análise das constantes de tempo onde o sistema real entra em regime de permanente. Um sistema de controle é considerado estavel ou equilíbrio quando, na ausência de qualquer distúrbio ou sinal de entrada, a saída permanece no mesmo estado. O gráfico 3.6 mostra onde o sistema alcançou o estado de regime de estabilidade.

Grafico 3.6 - Curvas ao degrau unitário – Regime de permanente – Simulação 1

O estado permanente é alcançado matematicamente somente depois de um tempo infinito. Na prática, entretanto, é razoável que o tempo estimado de resposta seja no intervalo necessário para a curva alcançar e permanecer a 2 % da linha do valor final, que é de quatro constantes de tempo. A resposta alcança nos pontos 4,5 e 6 são respectivamente os valores de 97,4 %, 98,9 % e 99,6 %.

Para determinar a rapidez com um mínimo de cálculo, a natureza das características da resposta em frequência e pode ser aplicada na maioria dos projetos preliminares. No gráfico 3.7 é possível verificar que o sistema real e o ideal tem as mesmas características.

Grafico 3.7 - Diagrama de Bode – Simulação 1

À medida que a frequência de entrada aumenta, a saída não pode seguir mais a entrada, por que é necessário um certo intervalo de tempo para o sistema atingir uma amplitude elevada.

3.10.2 Simulação 2

Para a segunda simulação o sistema real é composto pelo controlador PID da função (1.1) e o motor CC da função 1.1. Para o sistema ideal 2 da função 1.2 apresentado na seção 3.8, onde a constante de tempo é igual a 0,5 segundo. A figura 3.8 mostra a simulação.

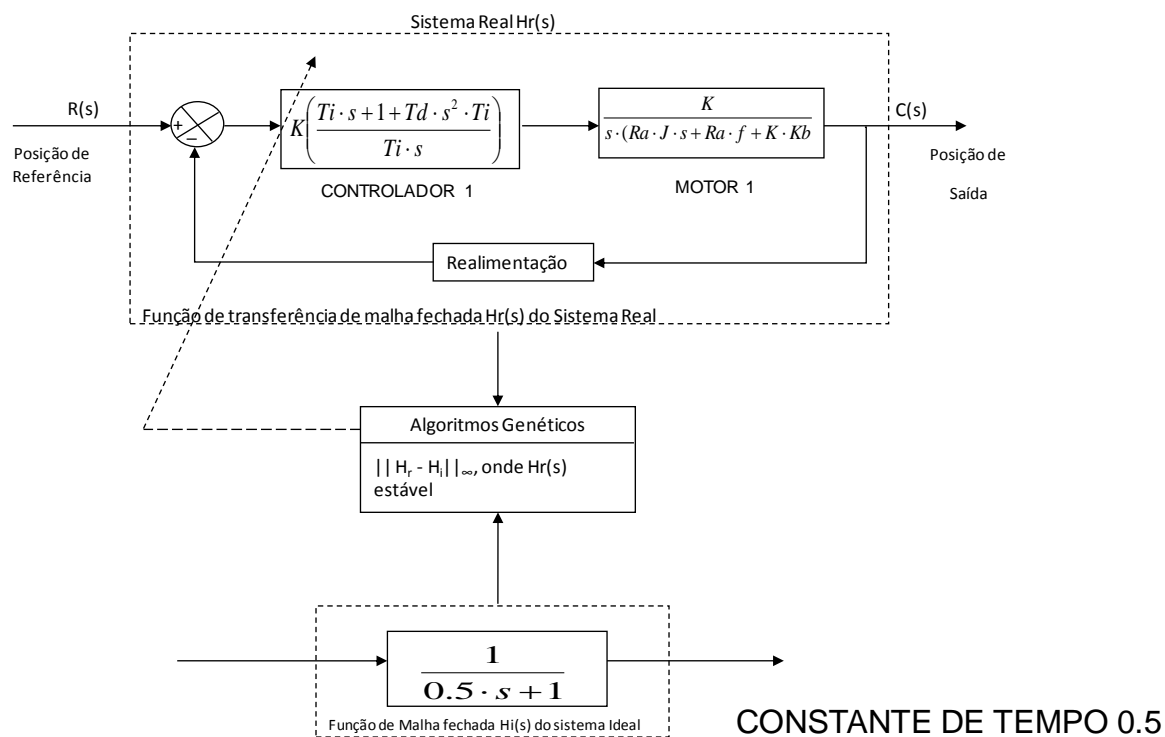
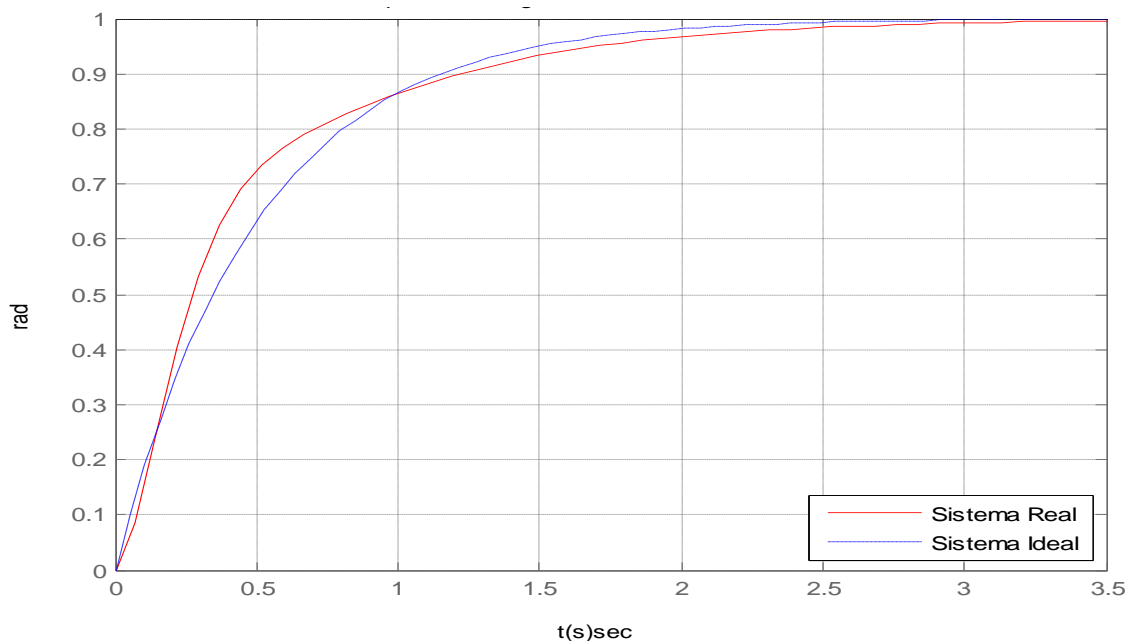


Figura 3.9 – Simulação 2 – Ajuste do controlador PID

A entrada do sistema real é unitária onde $R(s) = 1$. Como respostas da otimização do controlador é encontrado os seguintes valores dos parâmetros $K_p = 0.920$, $T_i = 0.001$, $T_d = 0.397$. Para isso temos a seguinte representação gráfica para curva de resposta conforme mostra o gráfico 3.8:

Gráfico 3.8 – Curvas de resposta ao degrau unitário- Sistema ideal e Sistema Real – Simulação 2

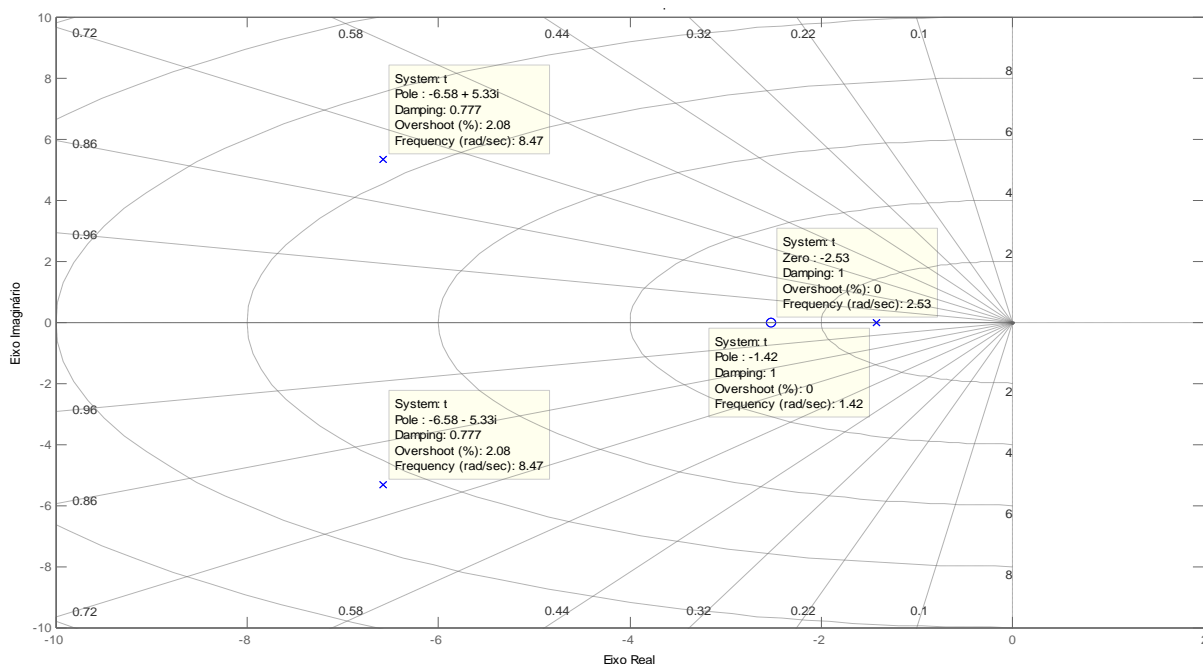


A função de transferência do sistema real é dada:

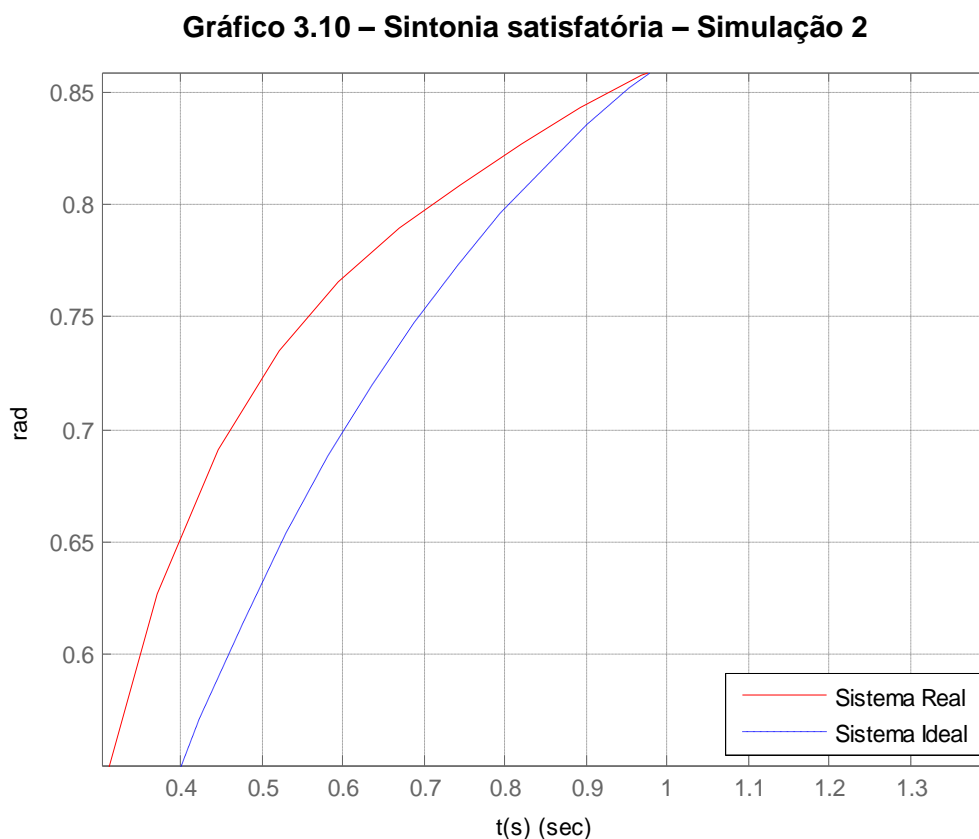
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{3.652 \cdot 10^{-6} \cdot s^2 + 0.003652 \cdot s + 0.0092}{9.01 \cdot 10^{-5} \cdot s^3 + 0.001314 \cdot s^2 + 0.008153 \cdot s + 0.0092} \quad (2)$$

O gráfico 3.9 mostra os pólos e zeros, onde o sistema é estável, pois todos os pólos estão situados à esquerda do semiplano do plano s.

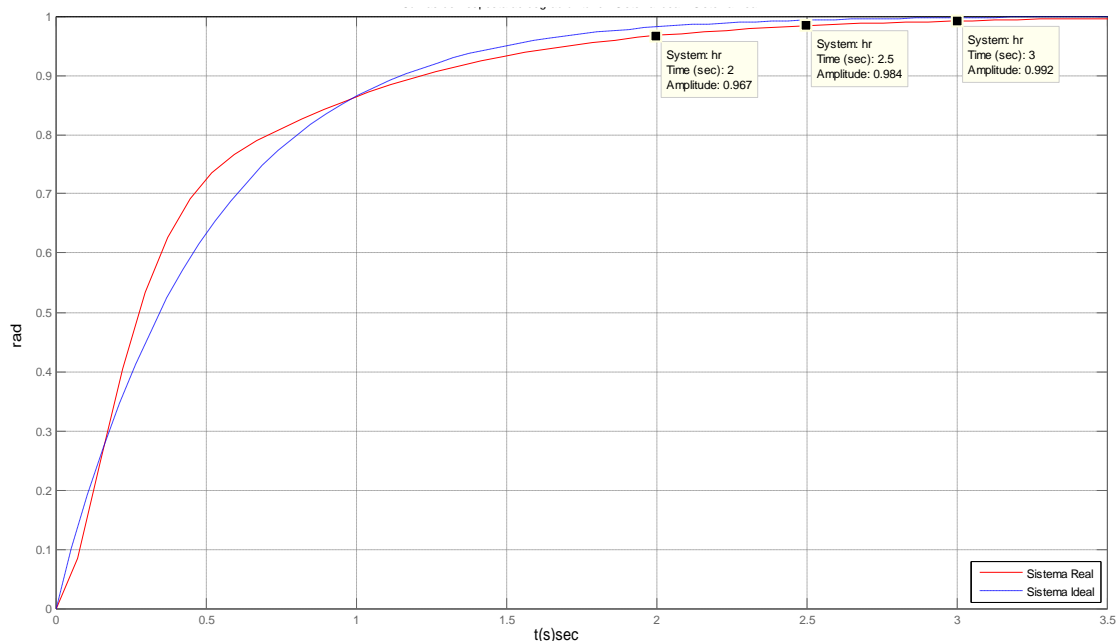
Gráfico 3.9 – Zeros e Pólos – Simulação 2



Para mostrar a diferença de aproximação entre o sistema real e o sistema ideal, onde a sintonia do controlador foi satisfatória. Fazendo uma aproximação no gráfico 3.10 para mostrar a semelhança entre os sistemas. O gráfico 3.10 mostra a diferença entre os sistemas. A norma encontrada é igual a 0.118.

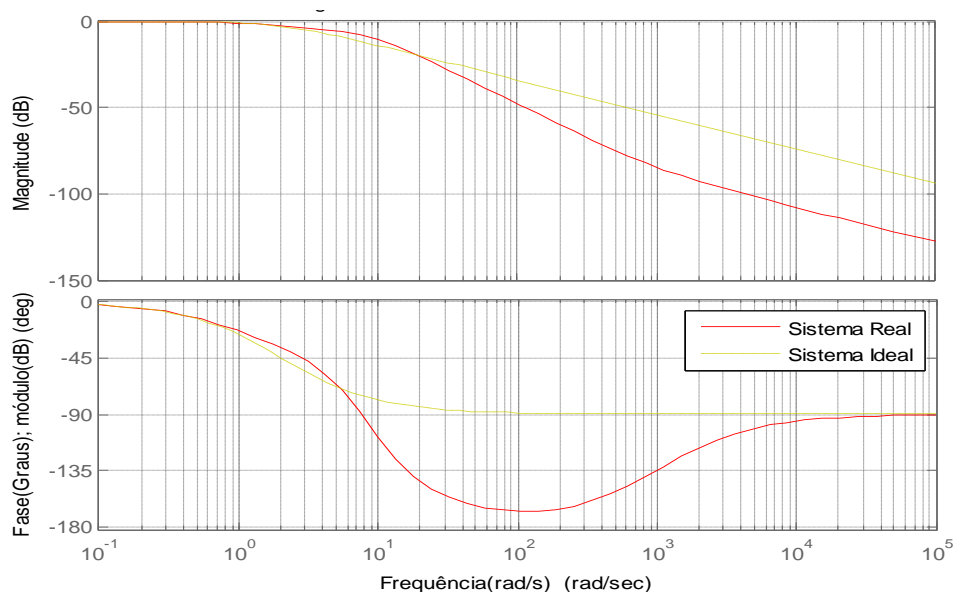


O tempo médio para a otimização da simulação 290 minutos. Para determinando o conjunto de valores de parametros do controlador PID, pode – se fazer uma análise das constantes de tempo onde o sistema real entra em regime de permanente. Um sistema de controle é considerado estável ou em equilíbrio quando, na ausência de qualquer distúrbio ou sinal de entrada, a saída permanece no mesmo estado. O gráfico 3.11 mostra onde o sistema alcançou o estado de regime de estabilidade.

Gráfico 3.11- Curvas ao degrau unitário – Regime de permanente – Simulação 2

O estado permanente é alcançado matematicamente somente depois de um tempo infinito. Na prática, entretanto, é razoável que o tempo estimado de resposta seja no intervalo necessário para a curva alcançar e permanecer a 2 % da linha do valor final, que é de quatro constantes de tempo. A resposta alcança nos pontos 2 e 2,5 e 3 são respectivamente os valores de 96,7 %, 98,4 % e 99,2%.

Para determinar a rapidez com um mínimo de cálculo, a natureza das características da resposta em frequência e pode ser aplicada na maioria dos projetos preliminares. No gráfico 3.12 é possível verificar que o sistema real e o ideal tem as mesmas características.

Gráfico 3.12 - Diagrama de Bode – Simulação 2

À medida que a frequência de entrada aumenta, a saída não pode seguir mais a entrada, por que é necessário um certo intervalo de tempo para o sistema atingir uma amplitude elevada.

3.10.3 Simulação 3

Para a terceira simulação o sistema real é composto pelo controlador PID da função (1.1) e o motor CC da função 1.2. Para o sistema ideal 1 da função 1.1 apresentado na seção 3.8, onde a constante de tempo é igual a 1 segundo. A figura 3.10 mostra a simulação.

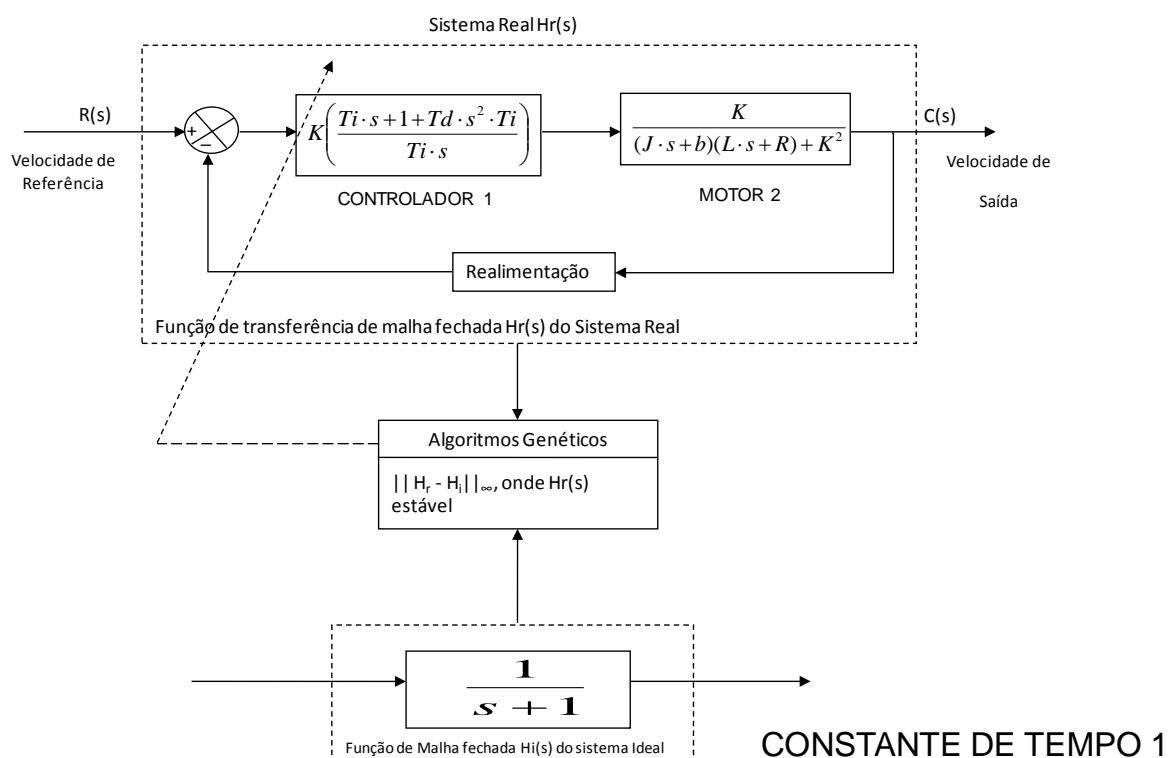
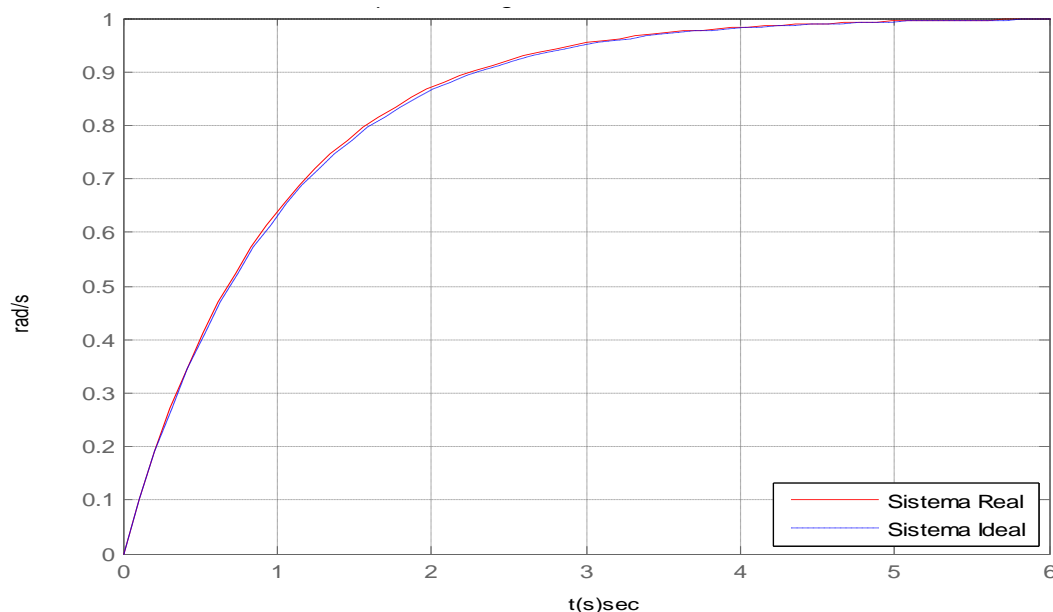


Figura 3.10 – Simulação 3 – Ajuste do controlador PID

A entrada do sistema real é unitária onde $R(s) = 1$. Como respostas da otimização do controlador é encontrado os seguintes valores dos parâmetros $K_p = 320.338$, $T_i = 59983.162$, $T_d = 64.001$. Para isso, temos a seguinte representação gráfica para curva de resposta conforme mostra o gráfico 3.13:

Gráfico 3.13 – Curvas de resposta ao degrau unitário- Sistema ideal e Sistema Real – Simulação 3

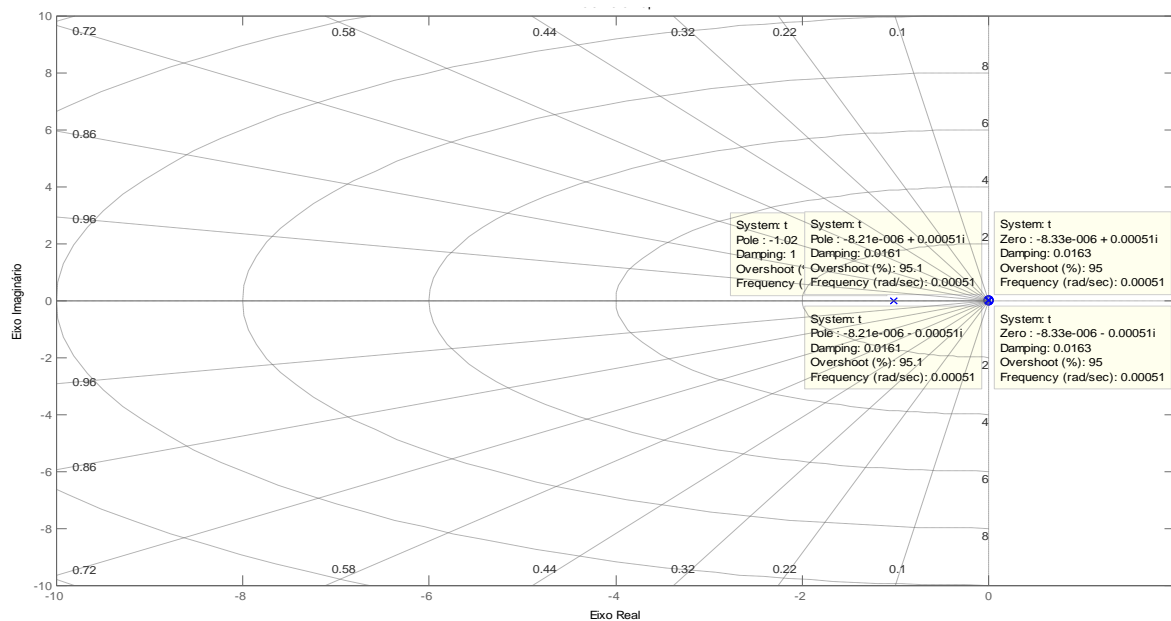


A função de transferência do sistema real é dada:

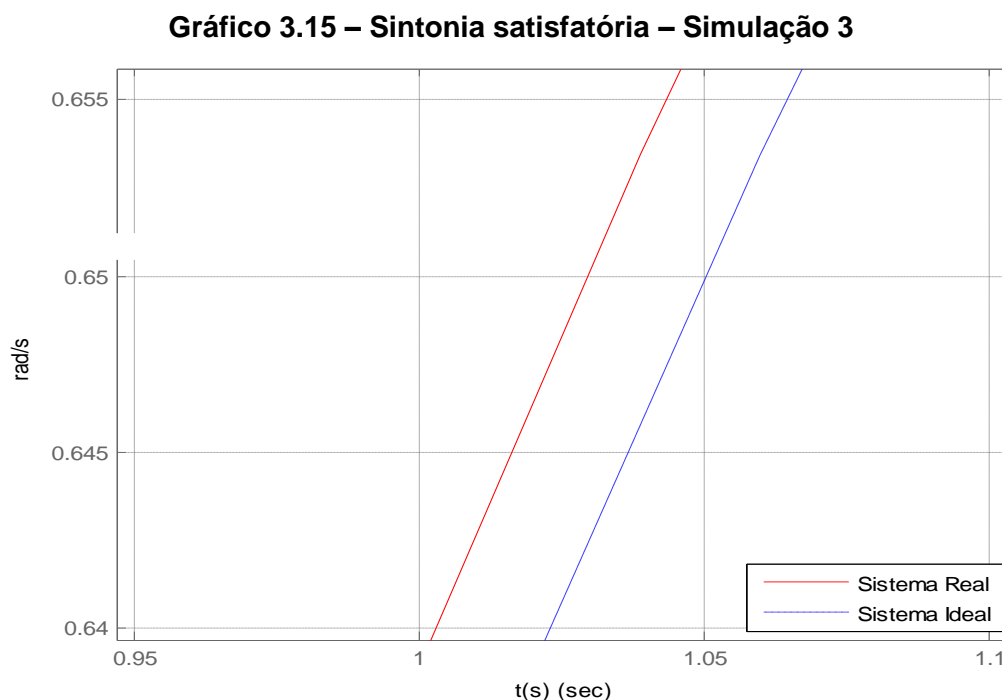
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{120300000 \cdot s^2 + 2005 \cdot s + 31.33}{117900000 \cdot s^3 + 120300000 \cdot s^2 + 2005 \cdot s + 31.33} \quad (3)$$

O gráfico 3.14 mostra os pólos e zeros, onde o sistema é estável, pois todos os pólos estão situados à esquerda do semiplano do plano s.

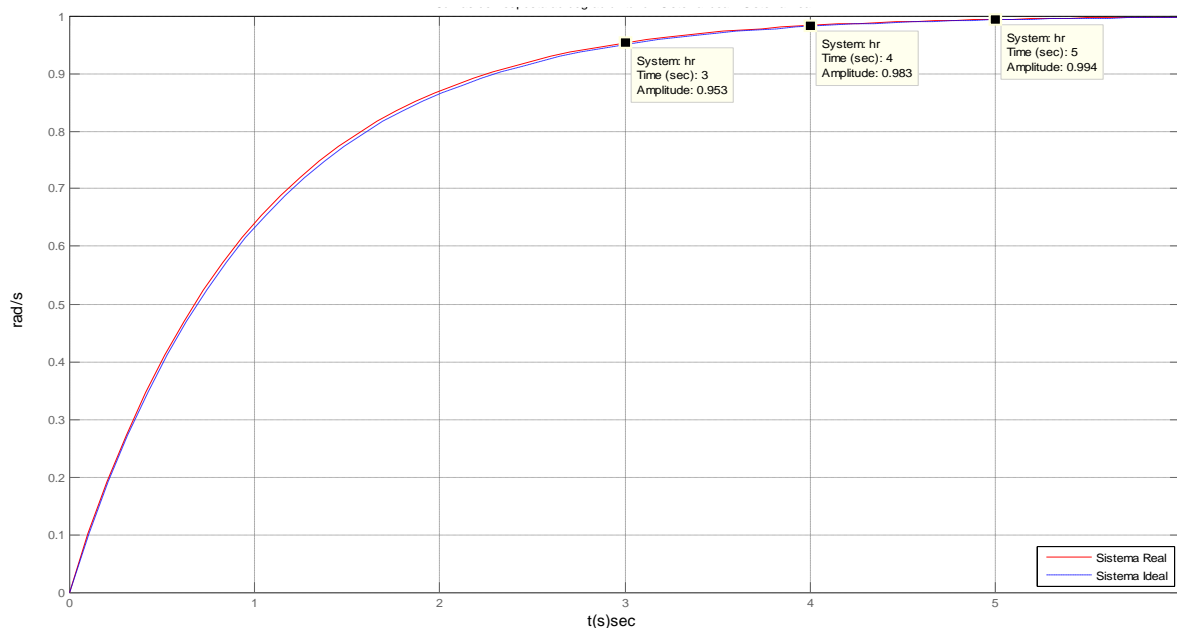
Gráfico 3.14 – Zeros e Pólos – Simulação 3



Para mostrar a diferença de aproximação entre o sistema real e o sistema ideal, onde a sintonia do controlador foi satisfatória. Fazendo uma aproximação no gráfico 3.13 para demonstrar a semelhança entre os sistemas. O gráfico 3.15 mostra a diferença entre os sistemas. A norma encontrada é igual a 0.016.

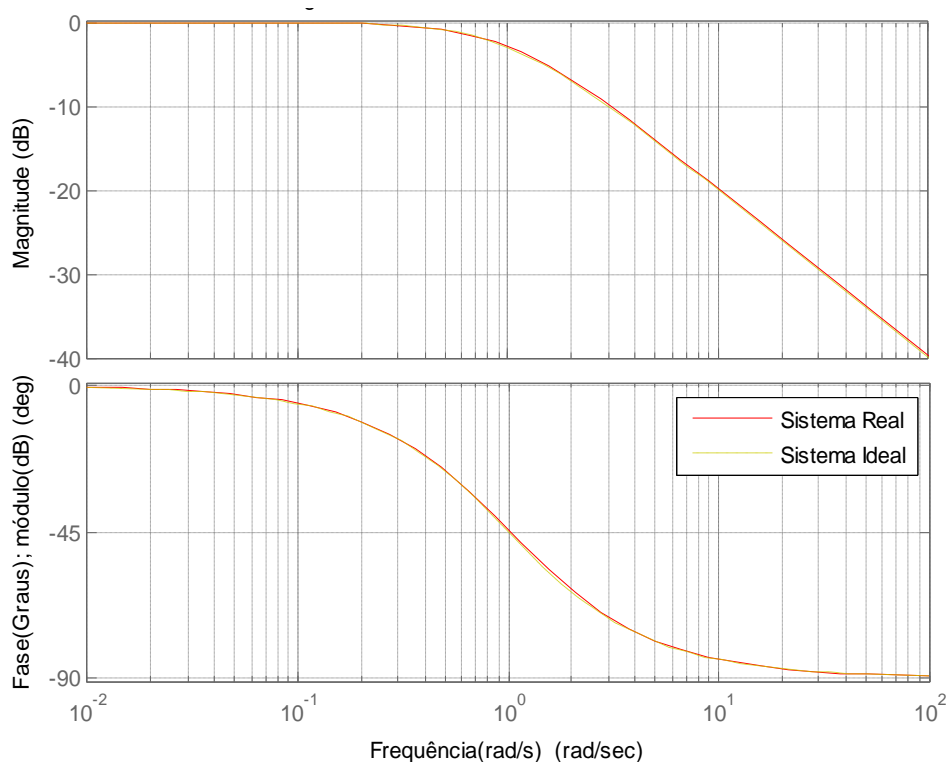


O tempo médio para a otimização da simulação é de 300 minutos. Para determinado o conjunto de valores de parâmetros do controlador PID, pode – se fazer uma análise das constantes de tempo onde o sistema real entra em regime de permanência. Um sistema de controle é considerado estável ou em equilíbrio quando, na ausência de qualquer distúrbio ou sinal de entrada, a saída permanece no mesmo estado. O gráfico 3.16 mostra onde o sistema alcançou o estado de regime de estabilidade.

Gráfico 3.16 - Curvas ao degrau unitário – Regime de permanente – Simulação 3

O estado permanente é alcançado matematicamente somente depois de um tempo infinito. Na prática, entretanto, é razoável que o tempo estimado de resposta seja no intervalo necessário para a curva alcançar e permanecer a 2 % da linha do valor final, que é de quatro constantes de tempo. A resposta alcança nos pontos 3, 4 e 5 são respectivamente os valores de 95,3 %, 98,3 % e 99,4 %.

Para determinar a rapidez com um mínimo de cálculo, a natureza das características da resposta em frequência e pode ser aplicada na maioria dos projetos preliminares. No gráfico 3.17 é possível verificar que o sistema real e o ideal tem as mesmas características.

Grafico 3.17 - Diagrama de Bode – Simulação 3

À medida que a frequência de entrada aumenta, a saída não pode seguir mais a entrada, por que é necessário um certo intervalo de tempo para o sistema atingir uma amplitude elevada.

3.10.4 Simulação 4

Para a quarta simulação o sistema real é composto pelo controlador PID da função (1.1) e o motor CC da função 1.2. Para o sistema ideal 2 da função 1.2 apresentado na seção 3.8, onde a constante de tempo é igual a 1 segundo. A figura 3.11 mostra a simulação.

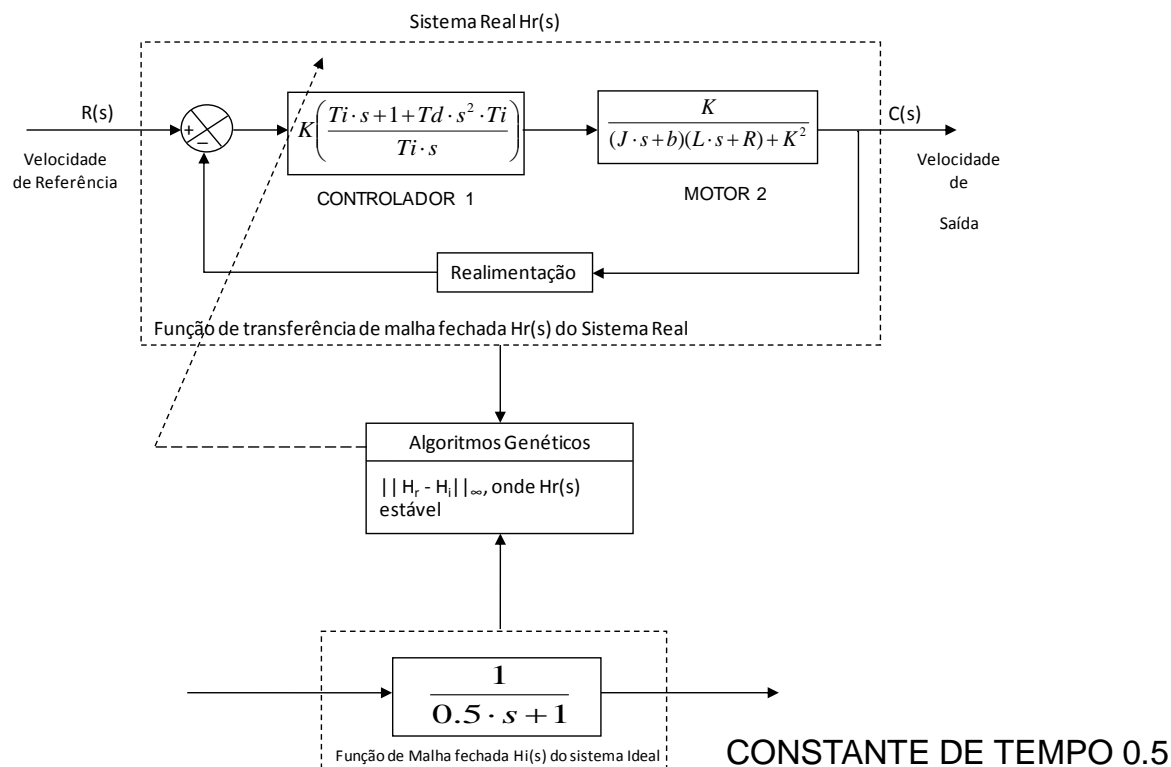
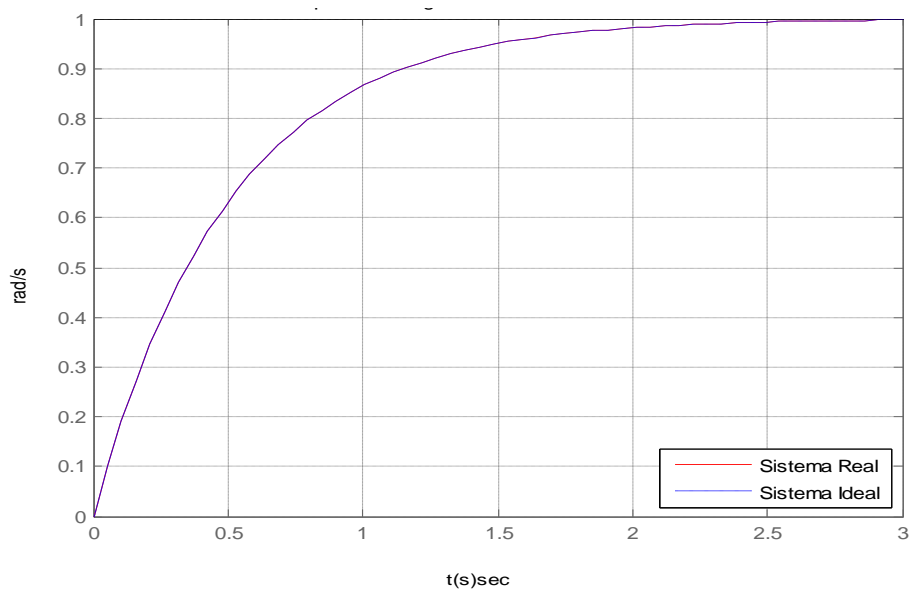


Figura 3.11 – Simulação 4 – Ajuste do controlador PID

A entrada do sistema real é unitária onde $R(s) = 1$. Como respostas da otimização do controlador é encontrado os seguintes valores dos parâmetros $K_p = 0.992$, $T_i = 59990.877$, $T_d = 40530.701$. Para isso temos a seguinte representação gráfica para curva de resposta conforme mostra o gráfico 3.18:

Gráfico 3.18 – Curvas de resposta ao degrau unitário- Sistema ideal e Sistema Real – Simulação 4

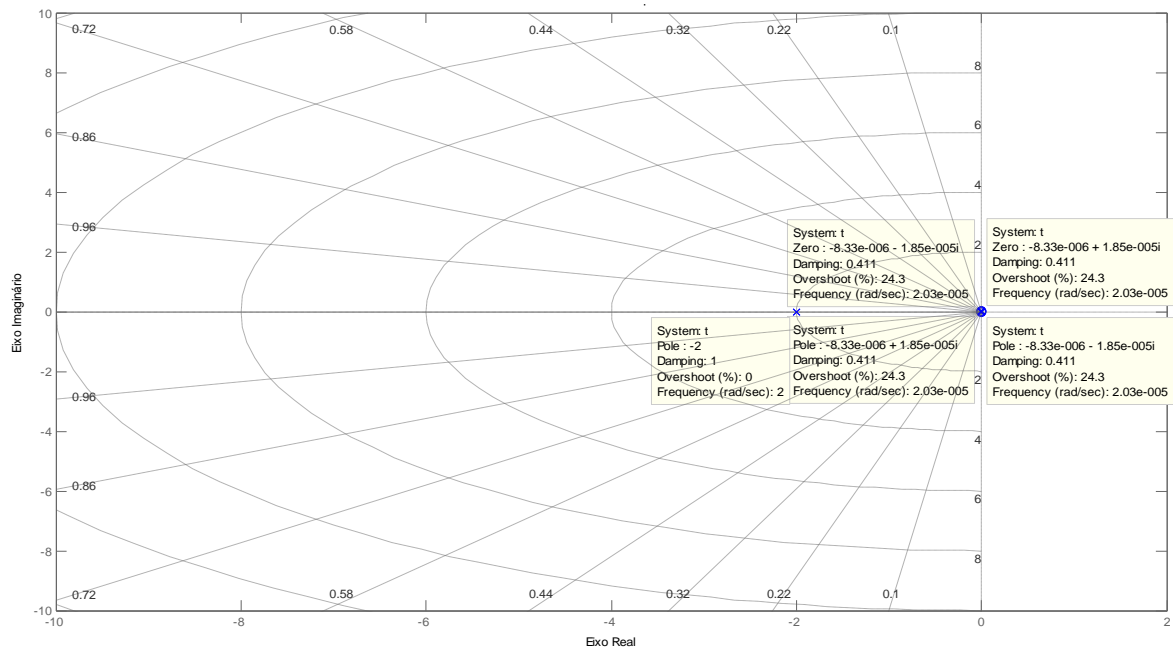


A função de transferência do sistema real é dada:

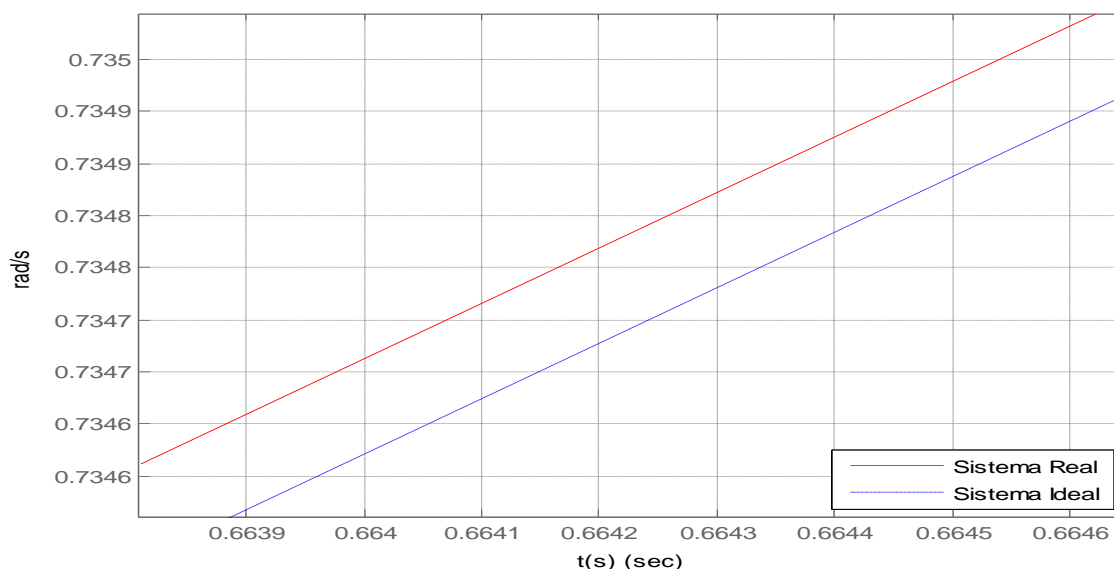
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{2.359 \cdot 10^8 \cdot s^2 + 3932 \cdot s + 0.09702}{1.179 \cdot 10^8 s^3 + 2.359 \cdot 10^8 \cdot s^2 + 3932 \cdot s + 0.09702} \quad (4)$$

O gráfico 3.19 mostra os pólos e zeros, onde o sistema é estável, pois todos os pólos estão situados à esquerda do semiplano do plano s.

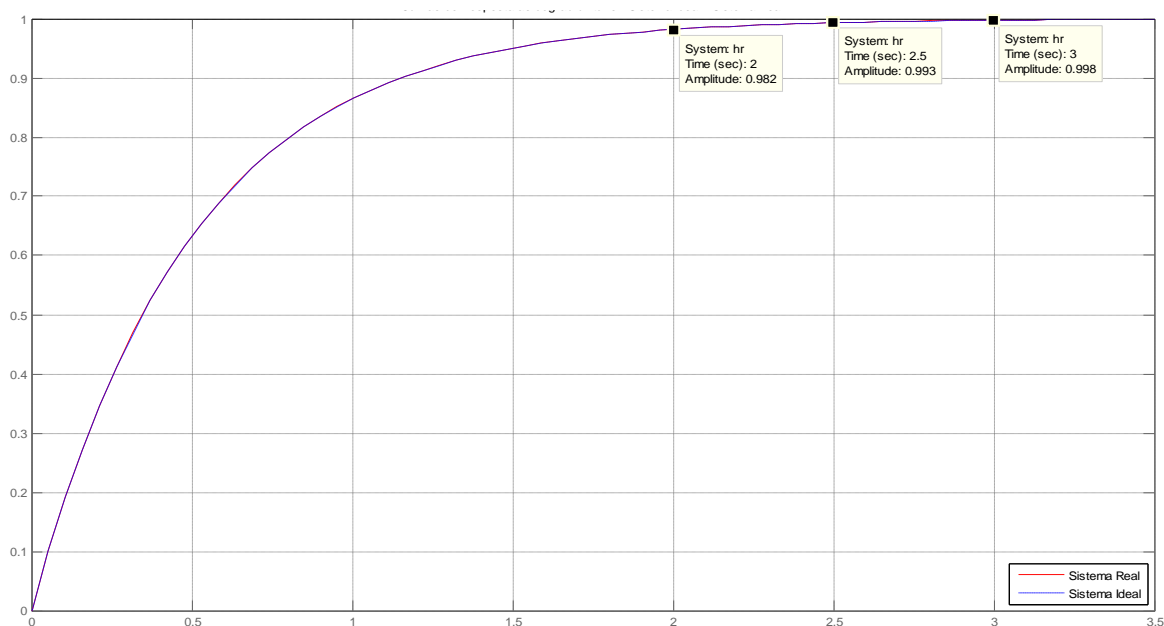
Gráfico 3.19 – Zeros e Pólos – Simulação 4



Para mostrar a diferença de aproximação entre o sistema real e o sistema ideal, onde a sintonia do controlador foi satisfatória. Fazendo uma aproximação no gráfico 3.20 para demonstrar a semelhança entre os sistemas. O gráfico 3.20 mostra a diferença entre os sistemas. A norma encontrada é igual a 0.000.

Gráfico 3.20 – Sintonia satisfatória – Simulação 4

O tempo médio para a otimização da simulação é de 280 minutos. Para determinado o conjunto de valores de parâmetros do controlador PID, pode – se fazer uma análise das constantes de tempo onde o sistema real entra em regime de permanente. Um sistema de controle é considerado estável ou em equilíbrio quando, na ausência de qualquer distúrbio ou sinal de entrada, a saída permanece no mesmo estado. O gráfico 3.21 mostra onde o sistema alcançou o estado de regime de estabilidade.

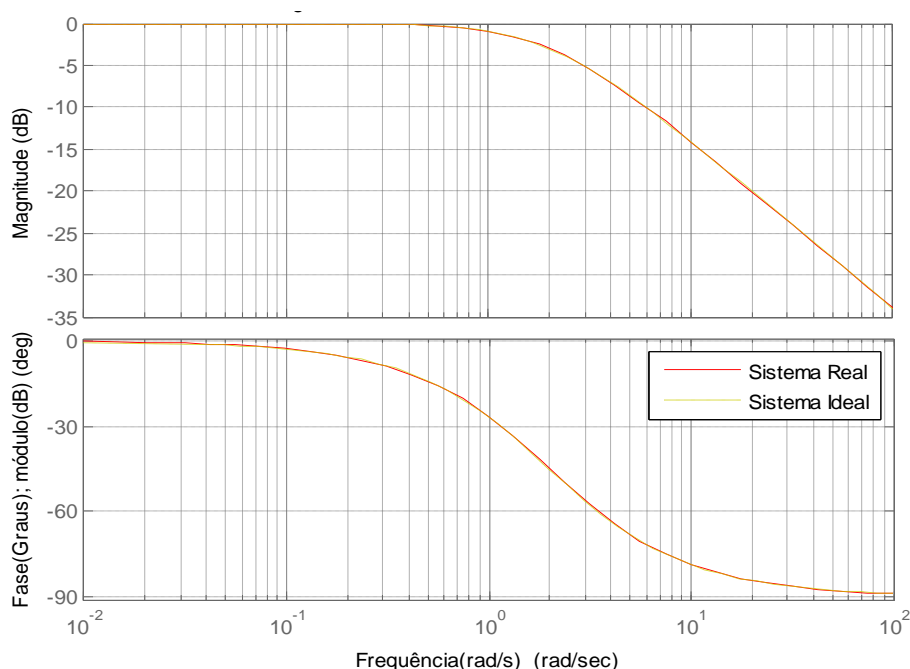
Gráfico 3.21 - Curvas ao degrau unitário – Regime de permanente – Simulação 4

O estado permanente é alcançado matematicamente somente depois de um tempo infinito. Na prática, entretanto, é razoável que o tempo estimado de resposta

seja no intervalo necessário para a curva alcançar e permanecer a 2 % da linha do valor final, que é de quatro constantes de tempo. A resposta alcança nos pontos 2, 2,5 e 3 são respectivamente os valores de 98,2 %, 99,3 % e 99,8 %.

Para determinar a rapidez com um mínimo de cálculo, a natureza das características da resposta em frequência e pode ser aplicada na maioria dos projetos preliminares. No gráfico 3.22 é possível verificar que o sistema real e o ideal tem as mesmas características.

Gráfico 3.22 - Diagrama de Bode – Simulação 4



À medida que a frequência de entrada aumenta, a saída não pode seguir mais a entrada, por que é necessário um certo intervalo de tempo para o sistema atingir uma amplitude elevada.

3.10.5 Simulação 5

Para a quarta simulação o sistema real é composto pelo controlador PID da função (1.2) e o motor CC da função (1.1). Para o sistema ideal 1 da função (1.1) apresentado na seção 3.8, onde a constante de tempo é igual a 1 segundo. A figura 3. mostra a simulação.

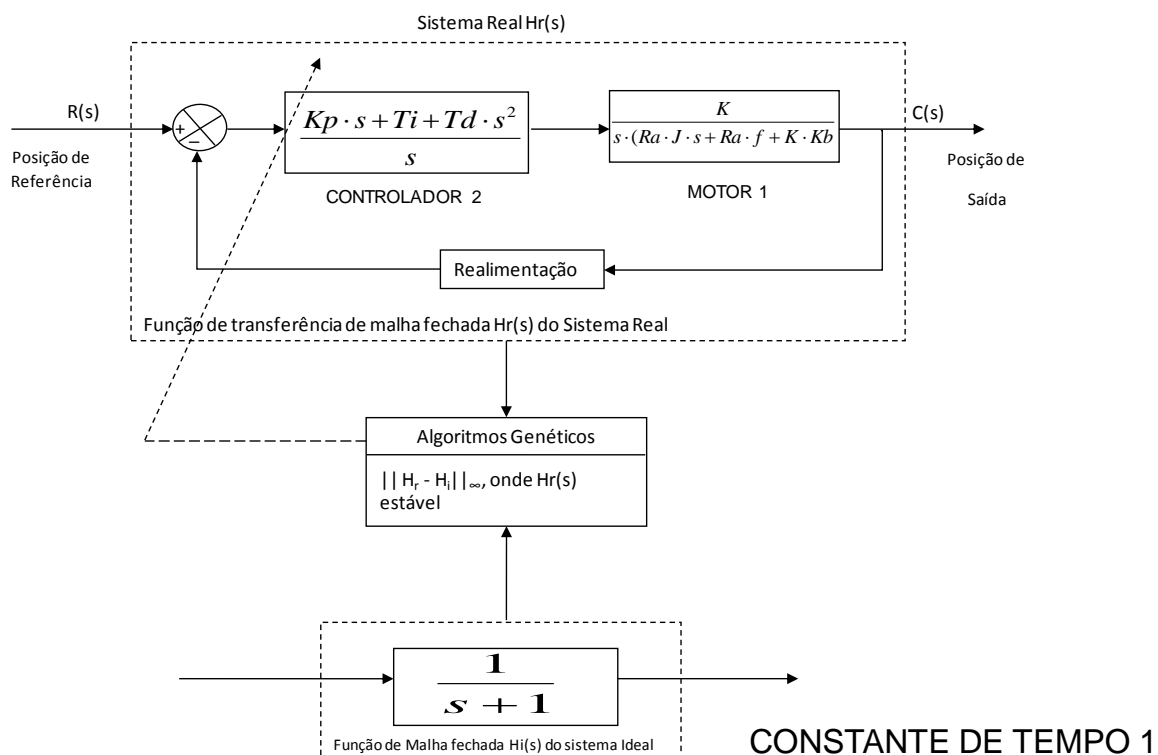
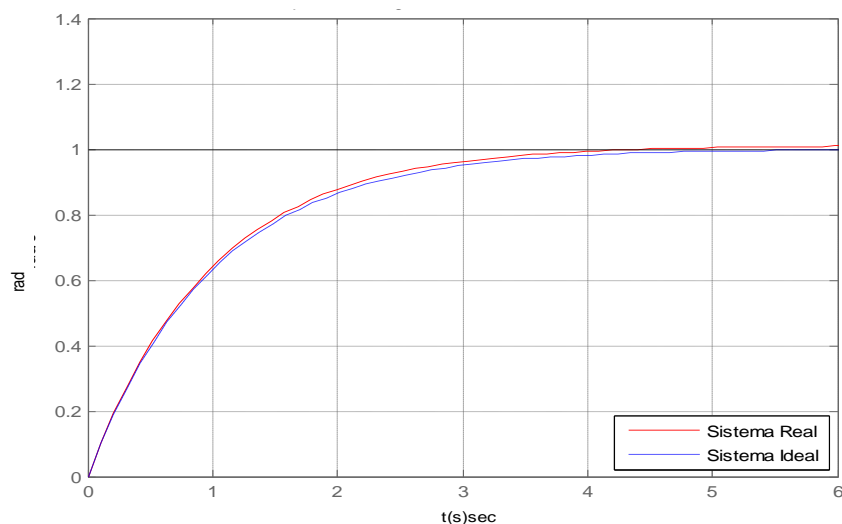


Figura 3.12 – Simulação 5 – Ajuste do controlador PID

A entrada do sistema real é unitária onde $R(s) = 1$. Como respostas da otimização do controlador são encontrado os seguintes valores dos parâmetros $K_p = 235.750$, $T_i = 1.940$, $T_d = 2.528.495$. Para isso temos a seguinte representação gráfica para curva de resposta conforme mostra o gráfico 3.23:

Gráfico 3.23 – Curvas de resposta ao degrau unitário- Sistema ideal e Sistema Real – Simulação 5

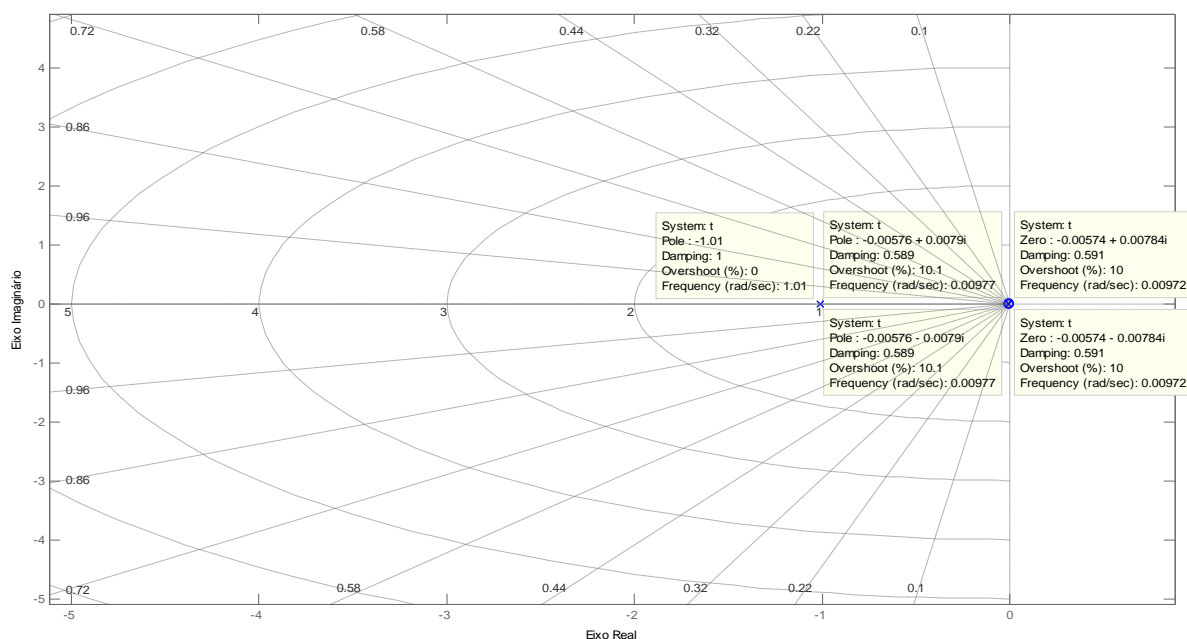


A função de transferência do sistema real é dada:

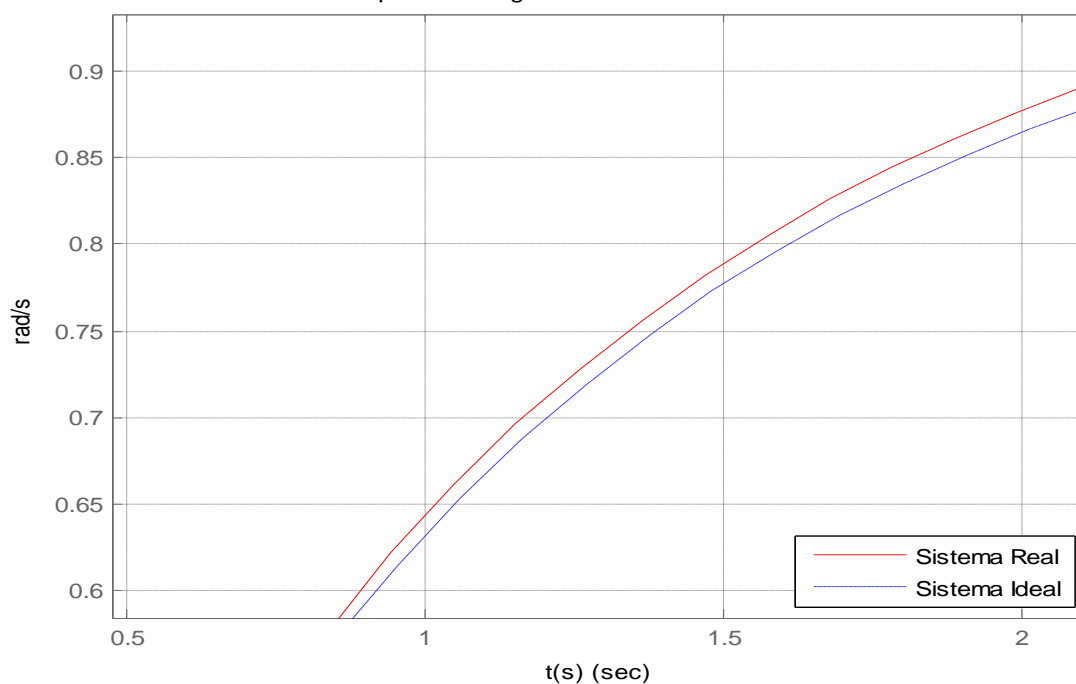
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{2008 \cdot s^2 + 23.06 \cdot s + 0.1897}{1966 \cdot s^3 + 2008 \cdot s^2 + 23.06 \cdot s + 0.1897} \quad (5)$$

O gráfico 3.24 mostra os pólos e zeros, onde o sistema é estável, pois todos os pólos estão situados à esquerda do semiplano do plano s.

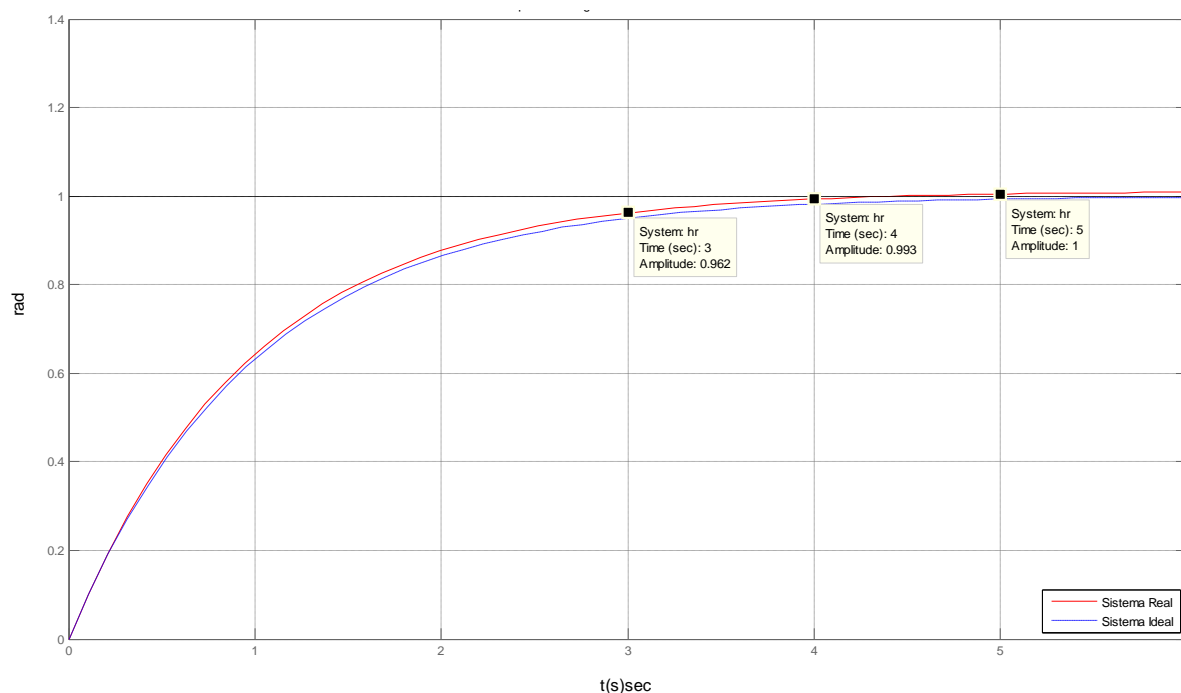
Gráfico 3.24 – Zeros e Pólos – Simulação 5



Para mostrar a diferença de aproximação entre o sistema real e o sistema ideal, onde a sintonia do controlador foi satisfatória. Fazendo uma aproximação no gráfico 3.25 para demonstrar a semelhança entre os sistemas. O gráfico 3.25 mostra a diferença entre os sistemas. A norma encontrada é igual a 0.014.

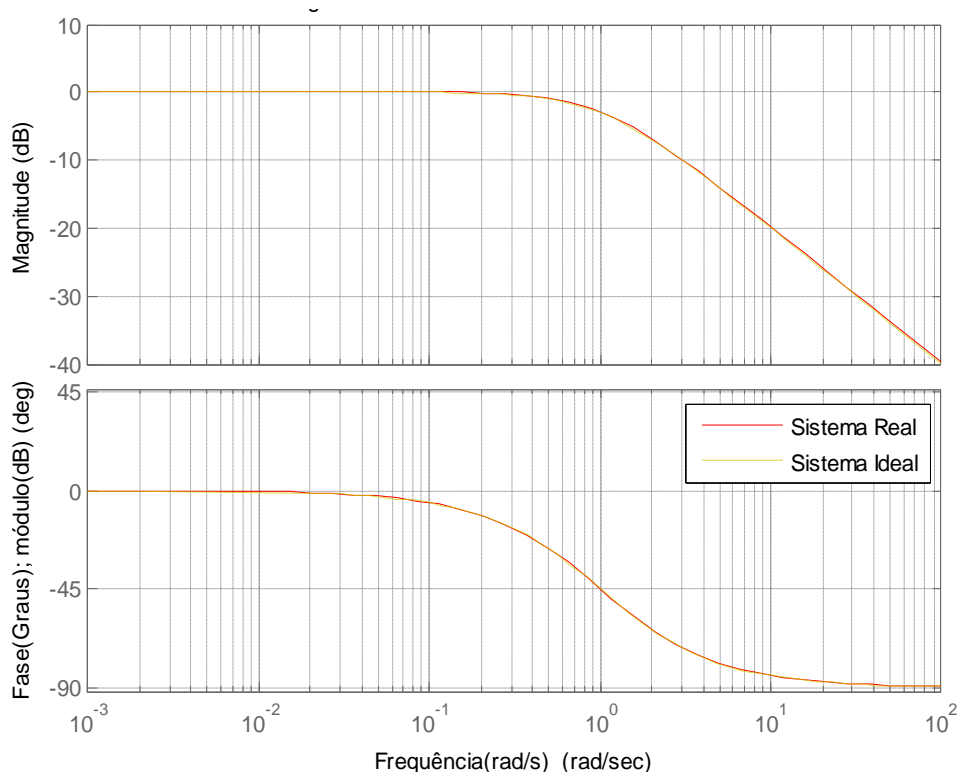
Gráfico 3.25 – Sintonia satisfatória – Simulação 5

O tempo médio para a otimização da simulação é de 320 minutos. Para determinando o conjunto de valores de parametros do controlador PID, pode – se fazer uma análise das constantes de tempo onde o sistema real entra em regime de permanência. Um sistema de controle é considerado estável ou em equilíbrio quando, na ausência de qualquer distúrbio ou sinal de entrada, a saída permanece no mesmo estado. O gráfico 3.26 mostra onde o sistema alcançou o estado de regime de estabilidade.

Gráfico 3.26 - Curvas ao degrau unitário – Regime de permanente – Simulação 5

O estado permanente é alcançado matematicamente somente depois de um tempo infinito. Na prática, entretanto, é razoável que o tempo estimado de resposta seja no intervalo necessário para a curva alcançar e permanecer a 2 % da linha do valor final, que é de quatro constantes de tempo. A resposta alcança nos pontos 2, 4 e 5 são respectivamente os valores de 96,2 %, 99,3 % e 100 %.

Para determinar a rapidez com um mínimo de cálculo, a natureza das características da resposta em frequência e pode ser aplicada na maioria dos projetos preliminares. No gráfico 3.27 é possível verificar que o sistema real e o ideal tem as mesmas características.

Gráfico 3.27 - Diagrama de Bode – Simulação 5

À medida que a frequência de entrada aumenta, a saída não pode seguir mais a entrada, por que é necessário um certo intervalo de tempo para o sistema atingir uma amplitude elevada.

3.10.6 Simulação 6

Para a quarta simulação o sistema real é composto pelo controlador PID da função (1.1) e o motor CC da função 1.2. Para o sistema ideal 2 da função 1.2 apresentado na seção 3.8, onde a constante de tempo é igual a 1 segundo. A figura 3.13 mostra a simulação.

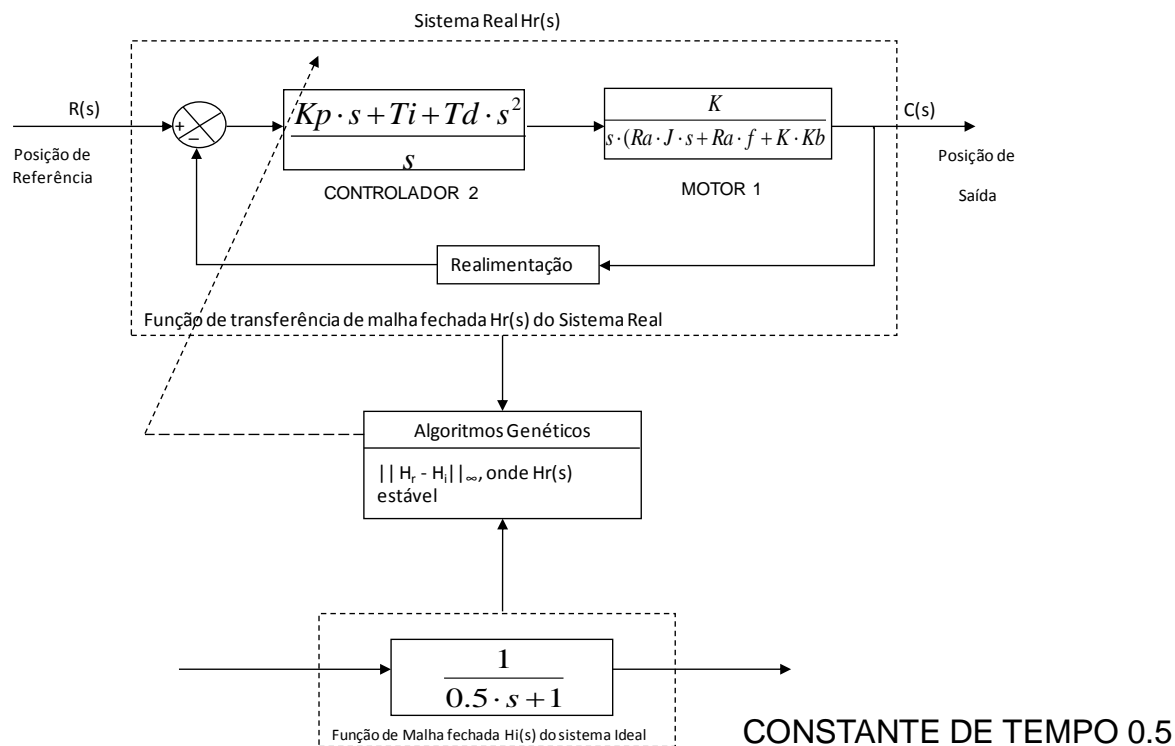
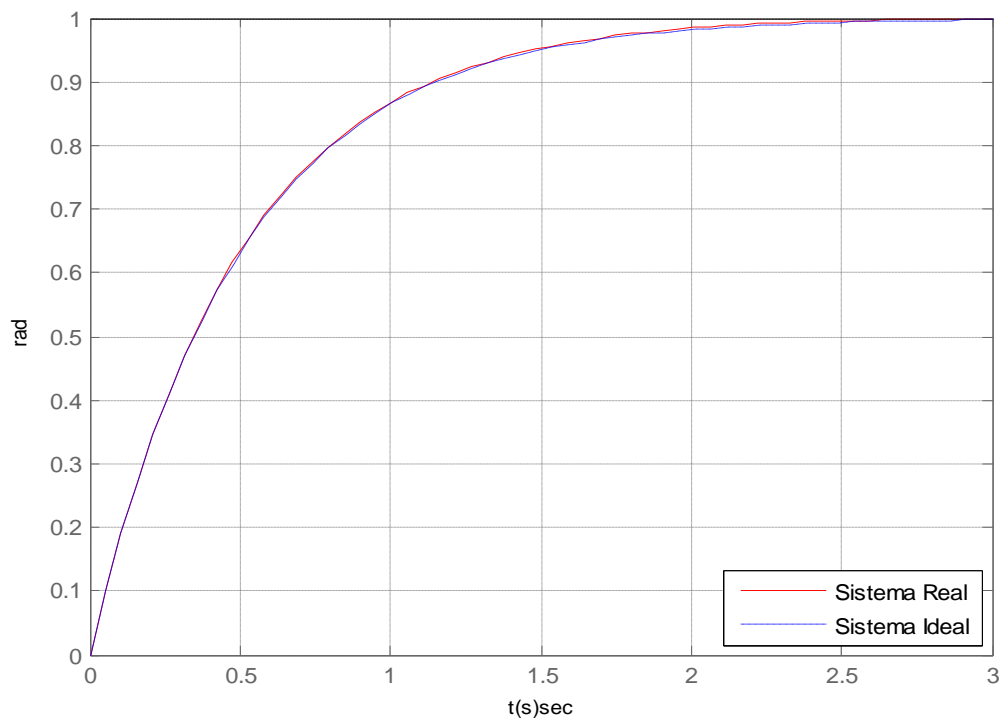


Figura 3.13 – Simulação 6 – Ajuste do controlador PID

A entrada do sistema real é unitária onde $R(s) = 1$. Como respostas da otimização do controlador é encontrado os seguintes valores dos parâmetros $Kp = 200.000$, $Ti = 0.689$, $Td = 40346.463$. Para isso temos a seguinte representação gráfica para curva de resposta conforme mostra o gráfico 3.28:

**Gráfico 3.28 – Curvas de resposta ao degrau unitário- Sistema ideal e Sistema Real –
Simulação 6**

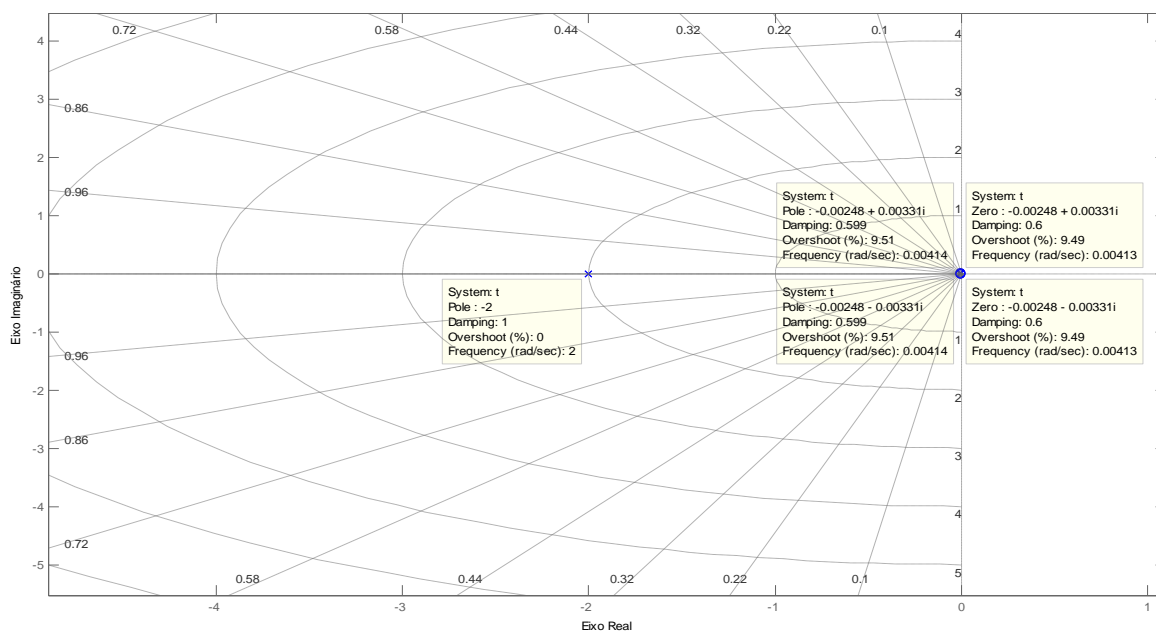


A função de transferência do sistema real é dada:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{3946s^2 + 19.56s + 0.06738}{1966s^3 + 3946s^2 + 19.56s + 0.06738} \quad (6)$$

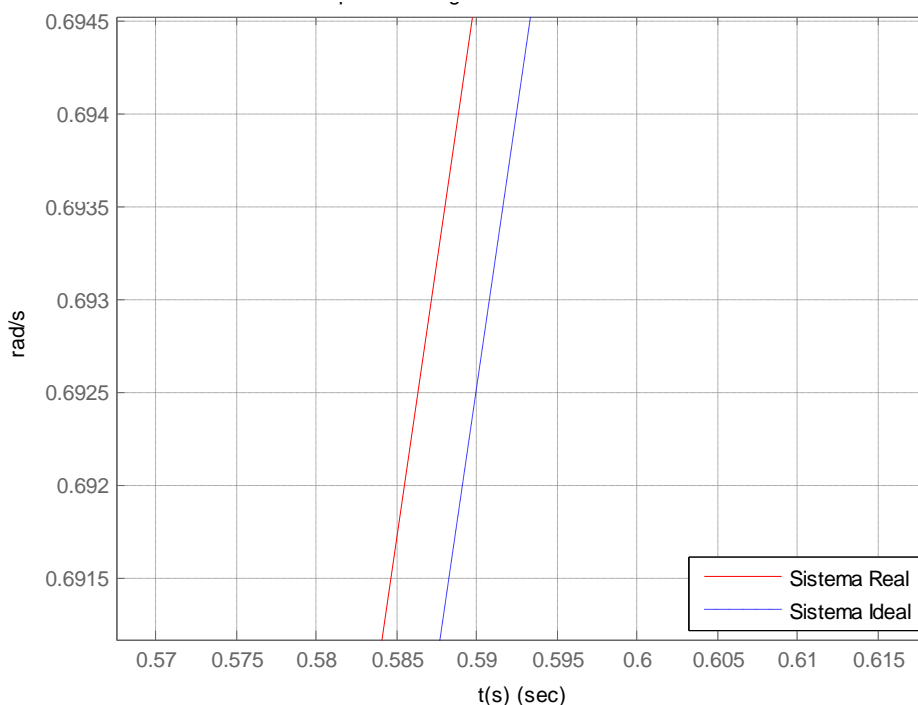
O gráfico 3.29 mostra os pólos e zeros, onde o sistema é estável, pois todos os pólos estão situados à esquerda do semiplano do plano s.

Gráfico 3.29 – Zeros e Pólos – Simulação 6



Para mostrar a diferença de aproximação entre o sistema real e o sistema ideal, onde a sintonia do controlador foi satisfatória. Fazendo uma aproximação no gráfico 3.30 para demonstrar a semelhança entre os sistemas. O gráfico 3.30 mostra a diferença entre os sistemas. A norma encontrada é igual a 0.003.

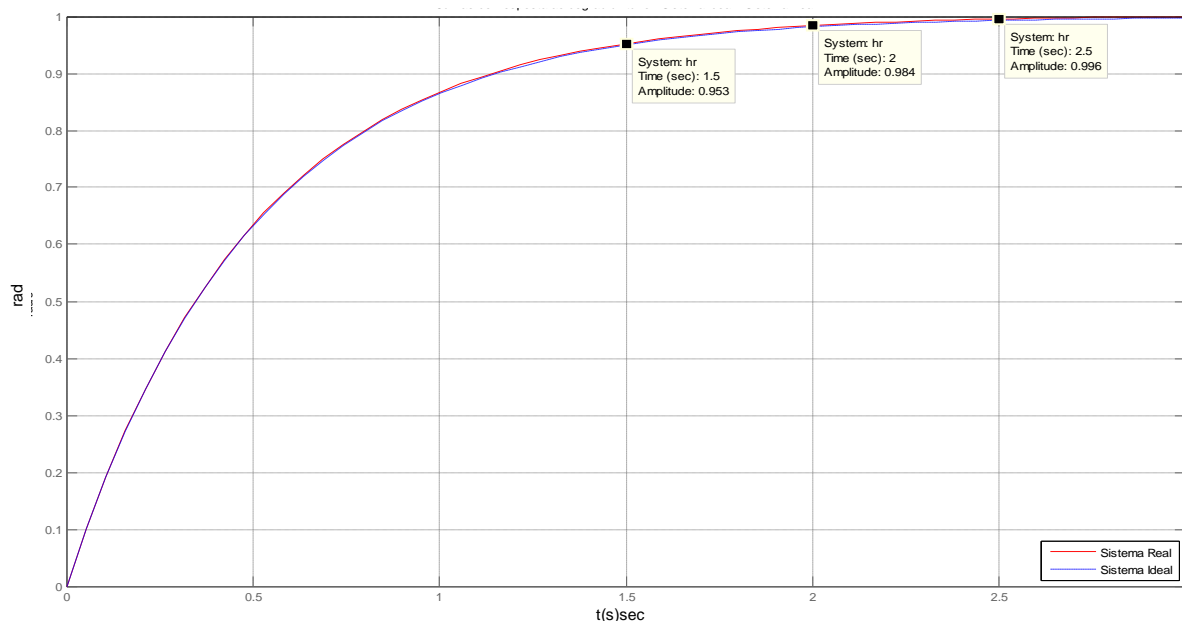
Gráfico 3.30 – Sintonia satisfatória – Simulação 6



O tempo médio para a otimização da simulação 316 minutos. Para determinado o conjunto de valores de parâmetros do controlador PID, pode – se

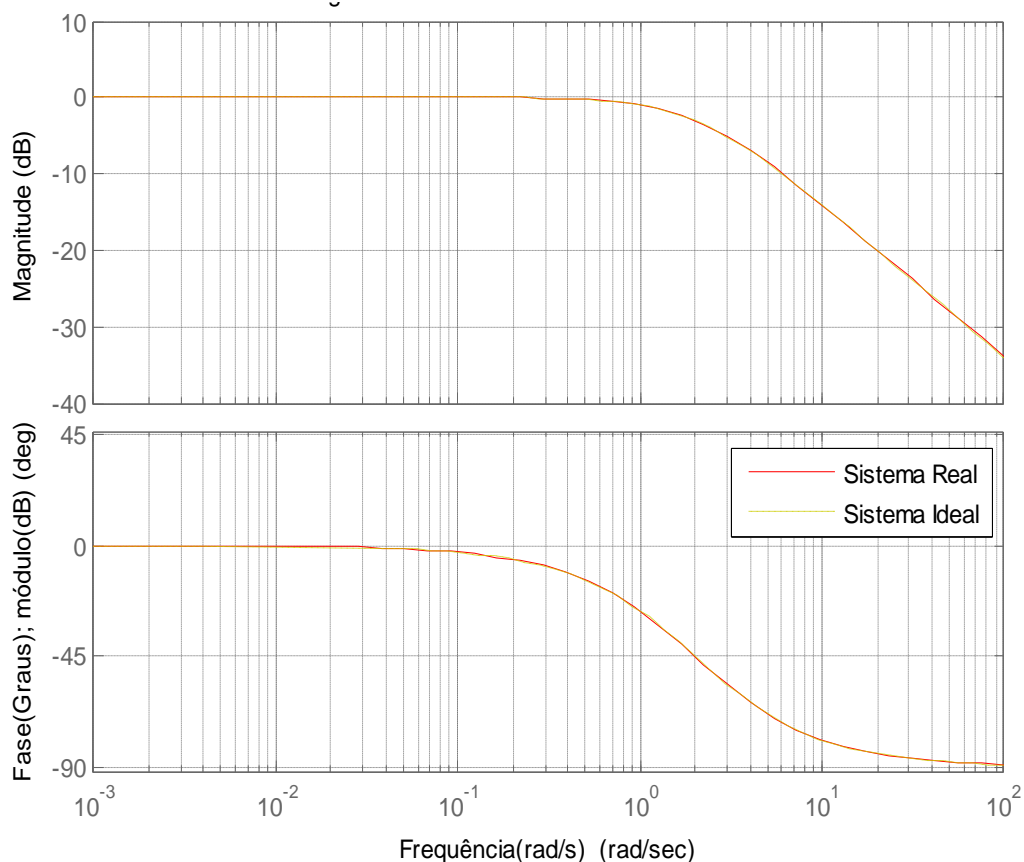
fazer uma análise das constantes de tempo onde o sistema real entra em regime de permanência. Um sistema de controle é considerado estável ou equilíbrio quando, na ausência de qualquer distúrbio ou sinal de entrada, a saída permanece no mesmo estado. O gráfico 3.31 mostra onde o sistema alcançou o estado de regime de estabilidade.

Gráfico 3.31 - Curvas ao degrau unitário – Regime de permanente – Simulação 6



O estado permanente é alcançado matematicamente somente depois de um tempo infinito. Na prática, entretanto, é razoável que o tempo estimado de resposta seja no intervalo necessário para a curva alcançar e permanecer a 2 % da linha do valor final, que é de quatro constantes de tempo. A resposta alcança nos pontos 1.5, 2 e 2.5 são respectivamente os valores de 95,3 %, 98,4 % e 99,6 %.

Para determinar a rapidez com um mínimo de cálculo, a natureza das características da resposta em frequência e pode ser aplicada na maioria dos projetos preliminares. No gráfico 3.32 é possível verificar que o sistema real e o ideal tem as mesmas características.

Gráfico 3.32 - Diagrama de Bode – Simulação 6

À medida que a frequência de entrada aumenta, a saída não pode seguir mais a entrada, por que é necessário um certo intervalo de tempo para o sistema atingir uma amplitude elevada.

3.10.7 Simulação 7

Para a quarta simulação o sistema real é composto pelo controlador PID da função (1.1) e o motor CC da função 1.2. Para o sistema ideal 1 da função 1.1 apresentado na seção 3.8, onde a constante de tempo é igual a 1 segundo. A figura 3.14 mostra a simulação.

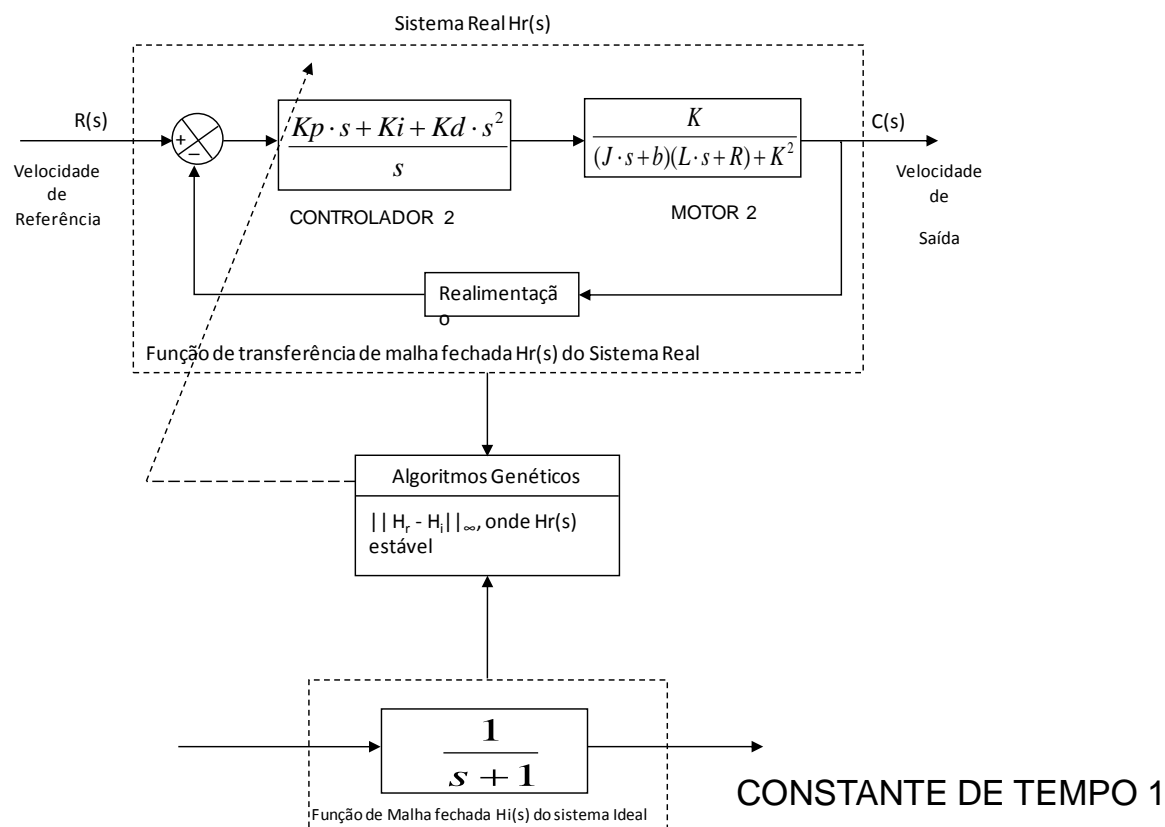
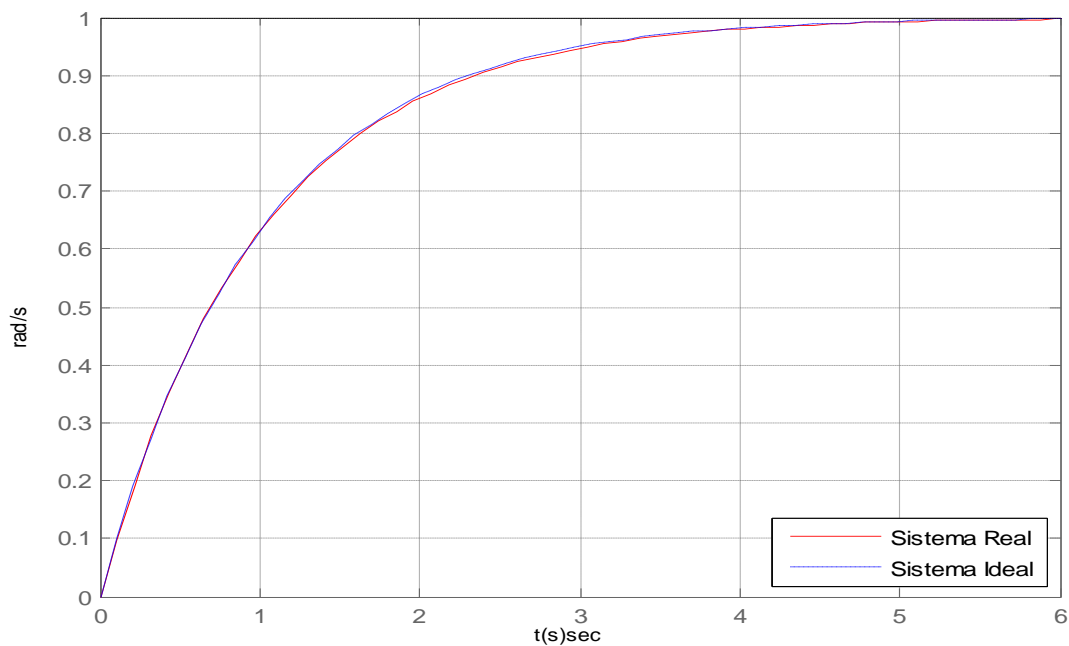


Figura 3.14 – Simulação 7 – Ajuste do controlador PID

A entrada do sistema real é unitária onde $R(s) = 1$. Como respostas da otimização do controlador é encontrado os seguintes valores dos parâmetros $K_p = 132.001$, $T_i = 443.467$, $T_d = 7.760$. Para isso temos a seguinte representação gráfica para curva de resposta conforme mostra o gráfico 3.33:

Gráfico 3.33 – Curvas de resposta ao degrau unitário- Sistema ideal e Sistema Real – Simulação 7

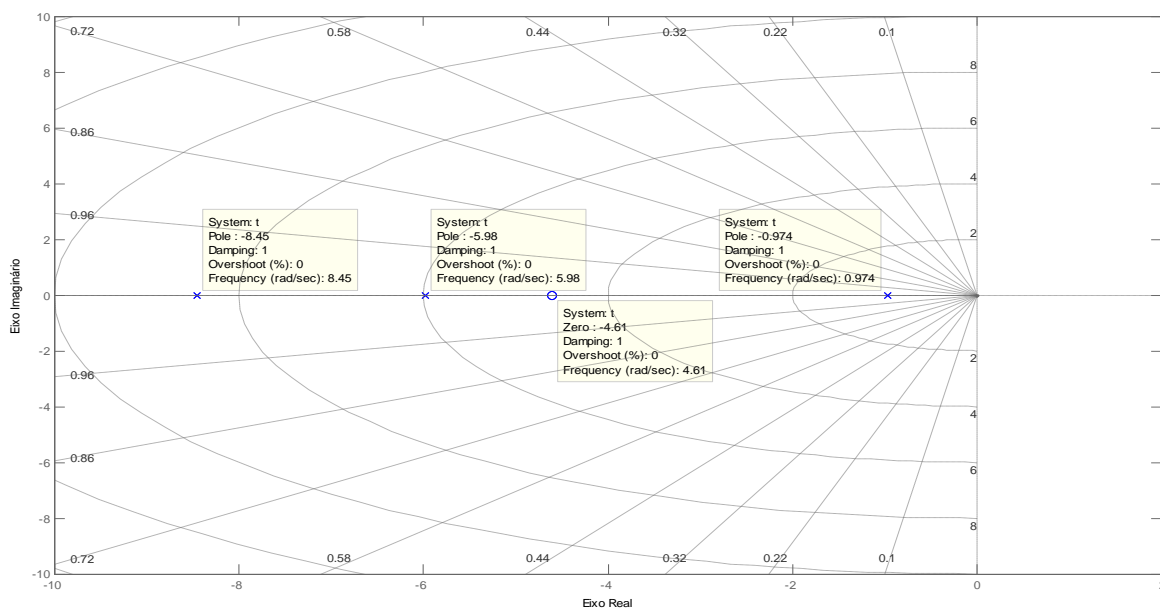


A função de transferência do sistema real é dada:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0.0776 \cdot s^2 + 1.32 \cdot s + 4.435}{0.0901 \cdot s^3 + 1.388 \cdot s^2 + 5.82 \cdot s + 4.435} \quad (7)$$

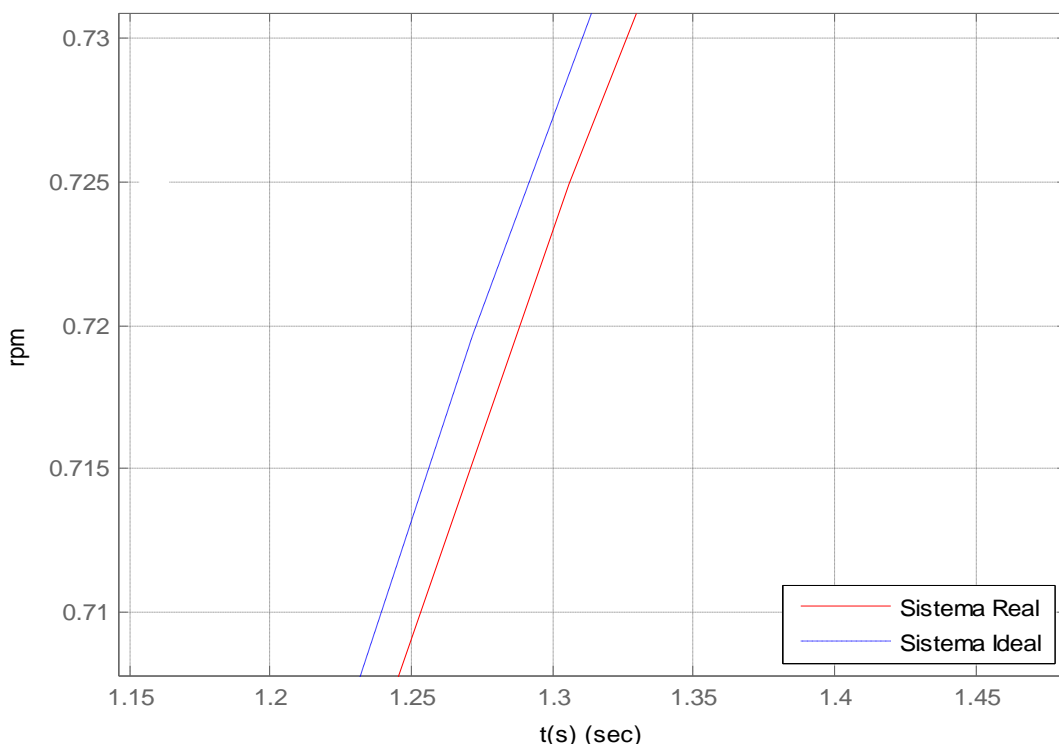
O gráfico 3.34 mostra os pólos e zeros, onde o sistema é estável, pois todos os pólos estão situados à esquerda do semiplano do plano s.

Gráfico 3.34 – Zeros e Pólos – Simulação 7

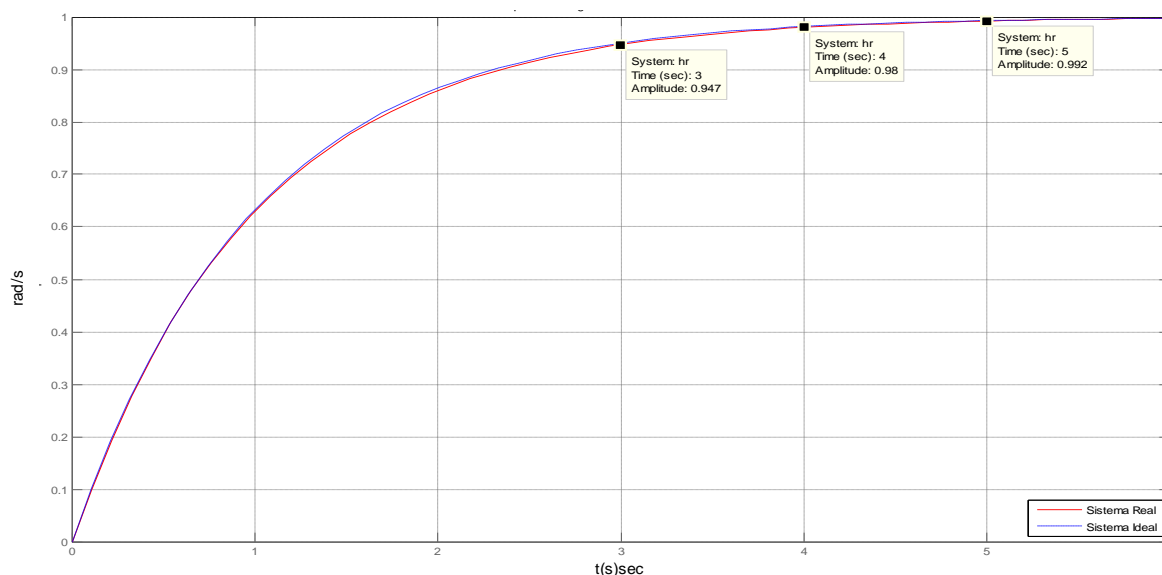


Para mostrar a diferença de aproximação entre o sistema real e o sistema ideal, onde a sintonia do controlador foi satisfatória. Fazendo uma aproximação no gráfico 3.35 para demonstrar a semelhança entre os sistemas. O gráfico 3.35 mostra a diferença entre os sistemas. A norma encontrada é igual a 0.009.

Gráfico 3.35 – Sintonia satisfatória – Simulação 7

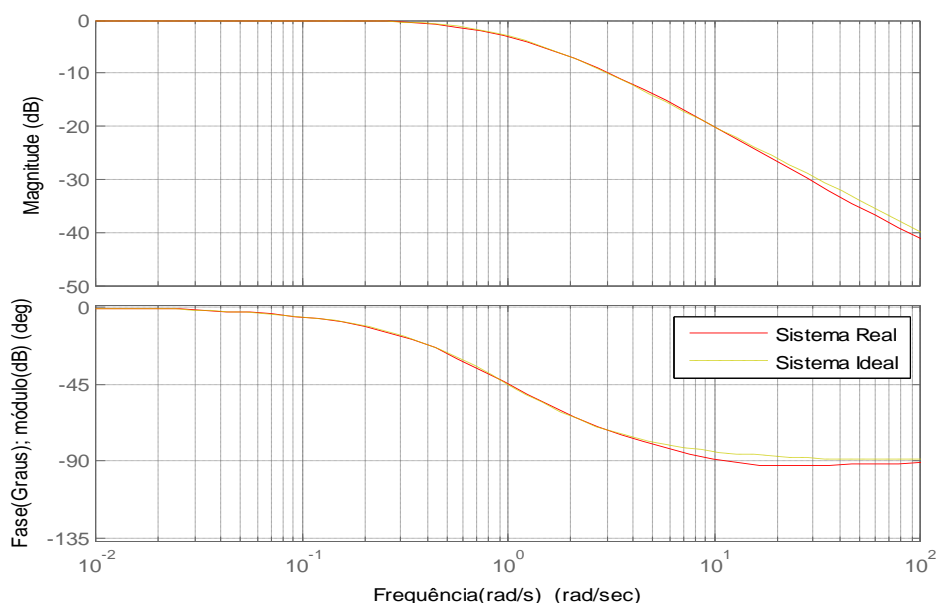


O tempo médio para a otimização da simulação 350 minutos. Para determinando o conjunto de valores de parametros do controlador PID, pode – se fazer uma análise das constantes de tempo onde o sistema real entra em regime de permanência. Um sistema de controle é considerado estável ou equilíbrio quando, na ausência de qualquer distúrbio ou sinal de entrada, a saída permanece no mesmo estado. O gráfico 3.36 mostra onde o sistema alcançou o estado de regime de estabilidade.

Gráfico 3.36 - Curvas ao degrau unitário – Regime de permanente – Simulação 7

O estado permanente é alcançado matematicamente somente depois de um tempo infinito. Na prática, entretanto, é razoável que o tempo estimado de resposta seja no intervalo necessário para a curva alcançar e permanecer a 2 % da linha do valor final, que é de quatro constantes de tempo. A resposta alcança nos pontos 2, 2,5 e 3 são respectivamente os valores de 94,7 %, 98 % e 99,2 %.

Para determinar a rapidez com um mínimo de cálculo, a natureza das características da resposta em frequência e pode ser aplicada na maioria dos projetos preliminares. No gráfico 3.37 é possível verificar que o sistema real e o ideal tem as mesmas características.

Gráfico 3.37 - Diagrama de Bode – Simulação 7

À medida que a frequência de entrada aumenta, a saída não pode seguir mais a entrada, por que é necessário um certo intervalo de tempo para o sistema atingir uma amplitude elevada.

3.10.8 Simulação 8

Para a quarta simulação o sistema real é composto pelo controlador PID da função (1.1) e o motor CC da função 1.2. Para o sistema ideal 2 da função 1.2 apresentado na seção 3.8, onde a constante de tempo é igual a 1 segundo. A figura 3.15 mostra a simulação.

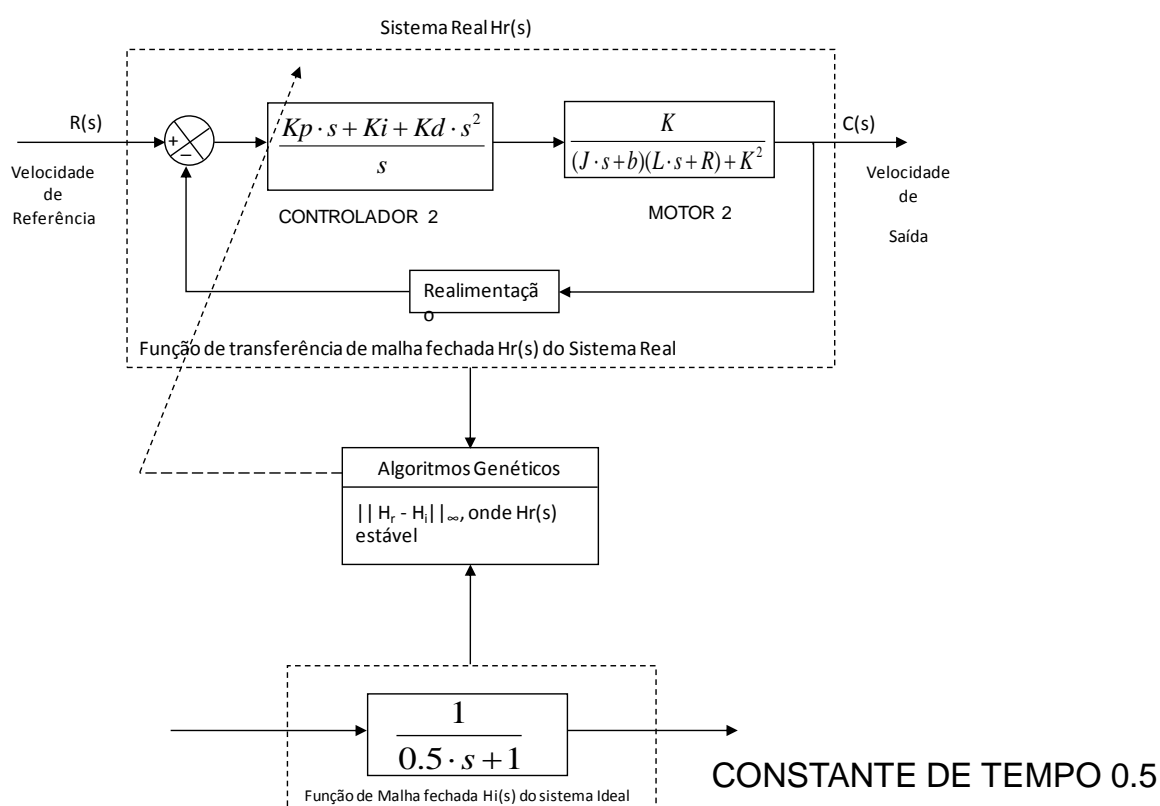
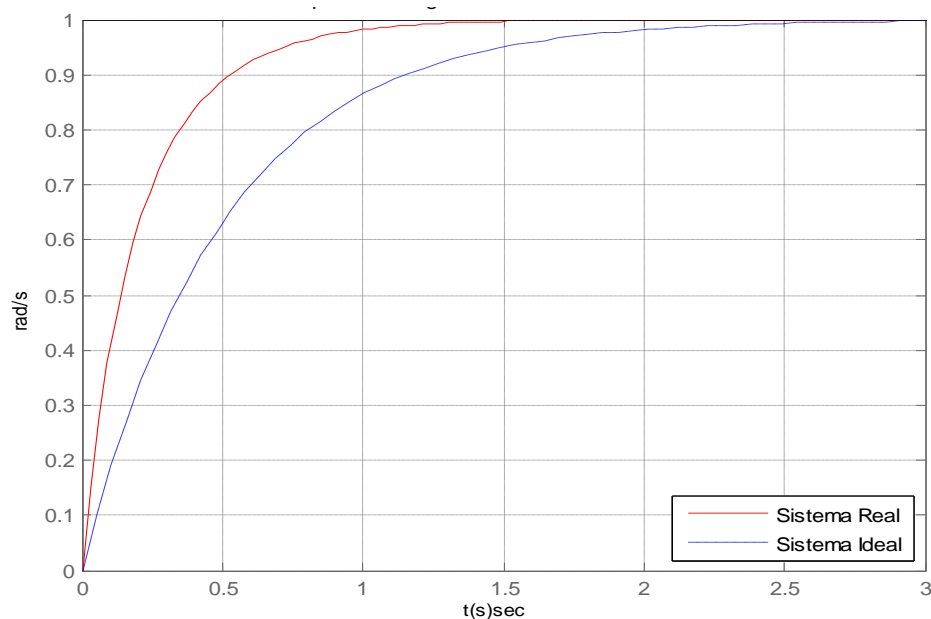


Figura 3.15 – Simulação 8 – Ajuste do controlador PID

A entrada do sistema real é unitária onde $R(s) = 1$. Como respostas da otimização do controlador é encontrado os seguintes valores dos parâmetros $K_p = 656.934$, $T_i = 2048.001$, $T_d = 49.454$. Para isso temos a seguinte representação gráfica para curva de resposta conforme mostra o gráfico 3.38:

Gráfico 3.38 – Curvas de resposta ao degrau unitário- Sistema ideal e Sistema Real – Simulação 8

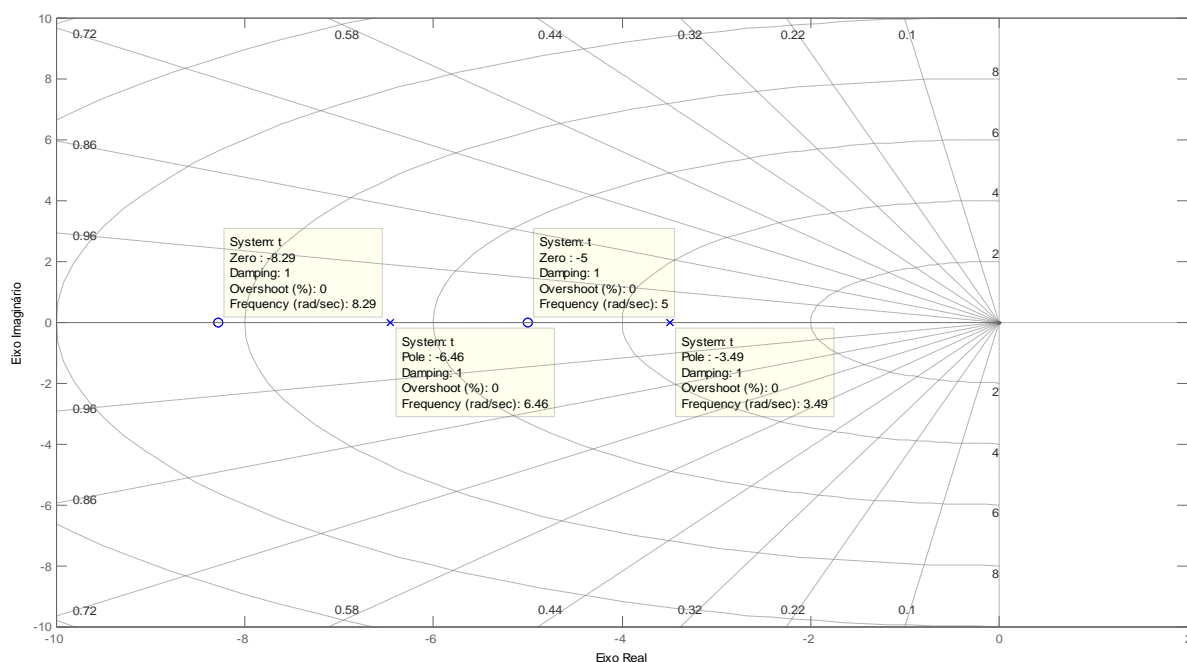


A função de transferência do sistema real é dada:

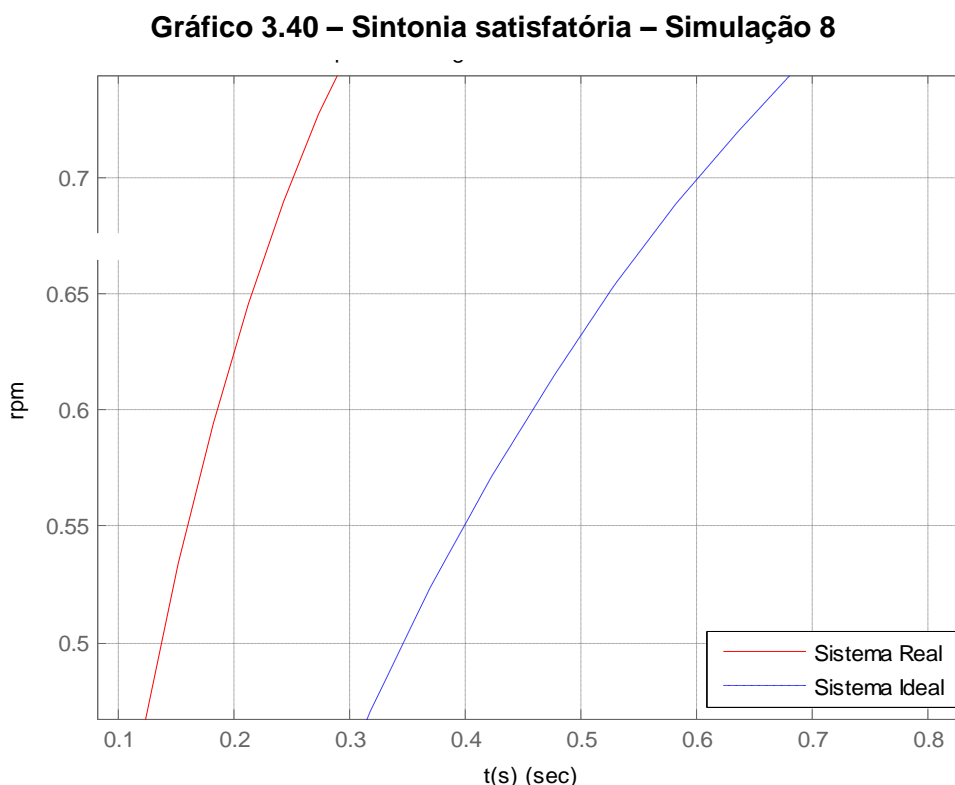
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0.4945 \cdot s^2 + 6.569 \cdot s + 20.48}{0.0901 \cdot s^3 + 1.805 \cdot s^2 + 11.07 \cdot s + 20.48} \quad (8)$$

O gráfico 3.39 mostra os pólos e zeros, onde o sistema é estável, pois todos os pólos estão situados à esquerda do semiplano do plano s.

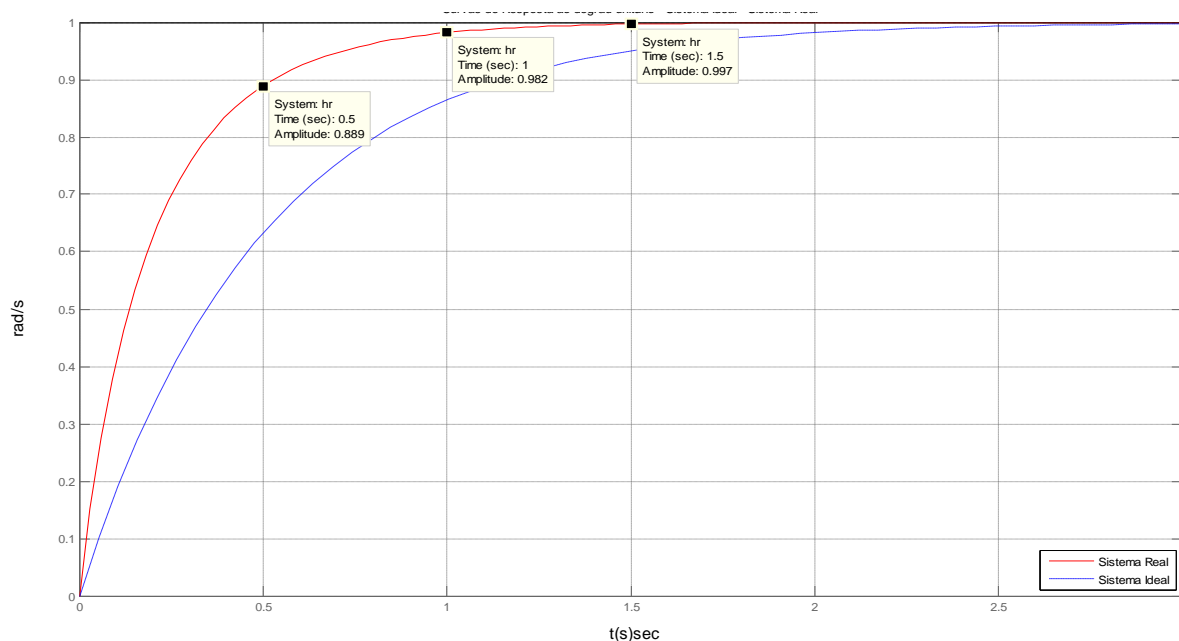
Gráfico 3.39 – Zeros e Pólos – Simulação 8



Para mostrar a diferença de aproximação entre o sistema real e o sistema ideal, onde a sintonia do controlador foi satisfatória. Fazendo uma aproximação no gráfico 3.40 para demonstrar a semelhança entre os sistemas. O gráfico 3.40 mostra a diferença entre os sistemas. A norma encontrada é igual a 0.044.

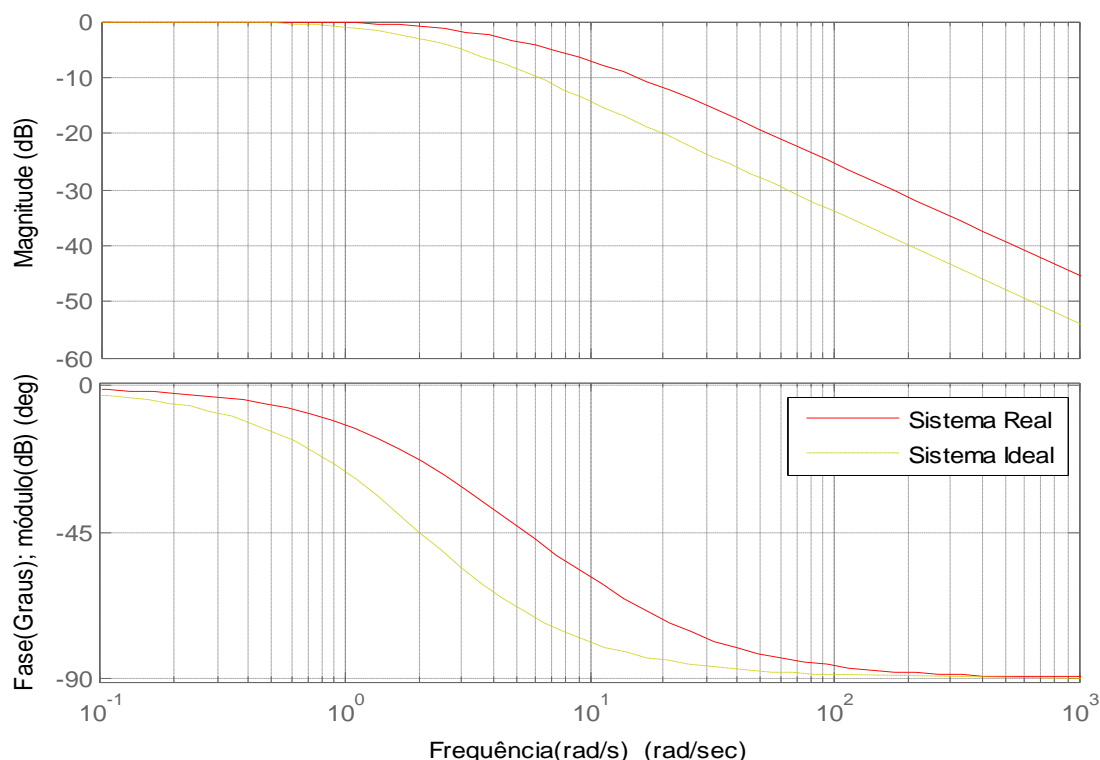


O tempo médio para a otimização da simulação é de 390 minutos. Para determinando o conjunto de valores de parametros do controlador PID, pode – se fazer uma análise das constantes de tempo onde o sistema real entra em regime de permanência. Um sistema de controle é considerado estável ou equilíbrio quando, na ausência de qualquer distúrbio ou sinal de entrada, a saída permanece no mesmo estado. O gráfico 3.41 mostra onde o sistema alcançou o estado de regime de estabilidade.

Gráfico 3.41 - Curvas ao degrau unitário – Regime de permanente – Simulação 8

O estado permanente é alcançado matematicamente somente depois de um tempo infinito. Na prática, entretanto, é razoável que o tempo estimado de resposta seja no intervalo necessário para a curva alcançar e permanecer a 2 % da linha do valor final, que é de quatro constantes de tempo. A resposta alcança nos pontos 2, 2,5 e 3 são respectivamente os valores de 88,9 %, 98,2 % e 99,7 %.

Para determinar a rapidez com um mínimo de cálculo, a natureza das características da resposta em frequência e pode ser aplicada na maioria dos projetos preliminares. No gráfico 3.42 é possível verificar que o sistema real e o ideal tem as mesmas características.

Gráfico 3.42 - Diagrama de Bode – Simulação 8

À medida que a frequência de entrada aumenta, a saída não pode seguir mais a entrada, por que é necessário um certo intervalo de tempo para o sistema atingir uma amplitude elevada.

3.11 Experimento e Resultados

Para o ajuste do sinal foi utilizada uma entrada de degrau unitário que apresentou resultados satisfatórios e robustos, pois ajustou o controlador PID. Com base nisto, foram realizados experimentos que consistem do teste de vários sinais de entrada – valor $R(s)$ – com o intuito de que para cada um destes sinais, o sinal de saída – valor $C(s)$ – seja equivalente.

Para o sistema em que o motor de corrente contínua é controlado pela velocidade pela tensão foi utilizado um valor rpm. Já para o sistema em que o motor de corrente contínua é controlado pelo ângulo pela tensão foi utilizado um valor de rad/s

3.12 Resultados Obtidos

Para os resultados das otimizações foram encontrado para cada modelo um valor de norma infinita para isso será utilizado o de menor valor para demonstrar que qualquer sinal de entrada do sistema de malha fechada será o mesmo da saída. Então $R(s)$ será igual a $C(s)$. Para a demonstração será utilizado a simulação 3, simulação 2, simulação 5 e a simulação 6.

3.13 Entrada e saída do sistema

Utilizando a Simulação 3, dado a entrada 5970 rpm. A figura 3.16 mostra o diagrama de blocos.

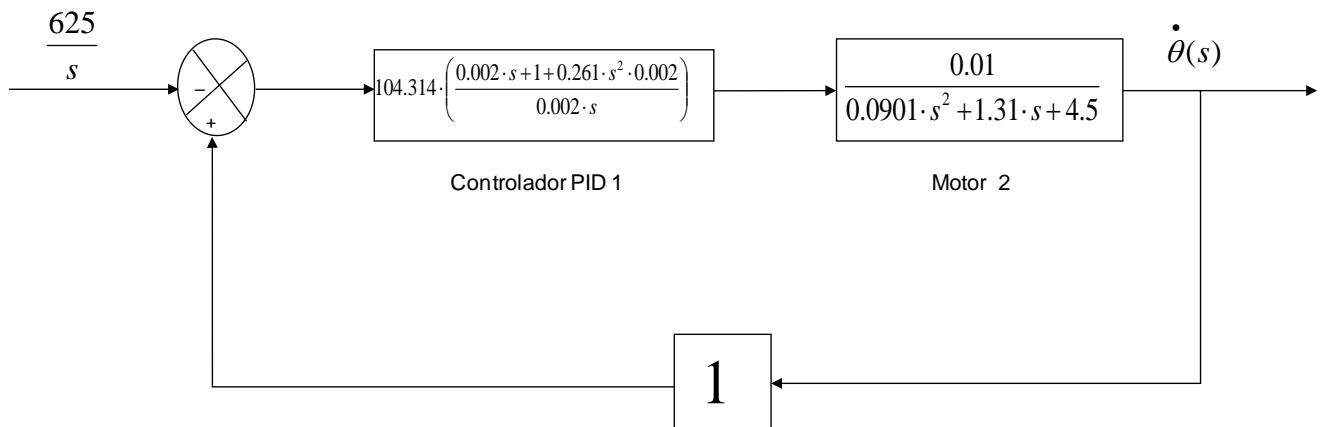


Figura 3.16 – Sistema de controle – Simulação 3

Temos a seguinte função de transferência:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0.0005445 \cdot s^2 + 0.2723 \cdot s + 1.043}{0.02352 \cdot s^3 + 0.3425 \cdot s^2 + 1.447 \cdot s + 1.043}$$

Temos,

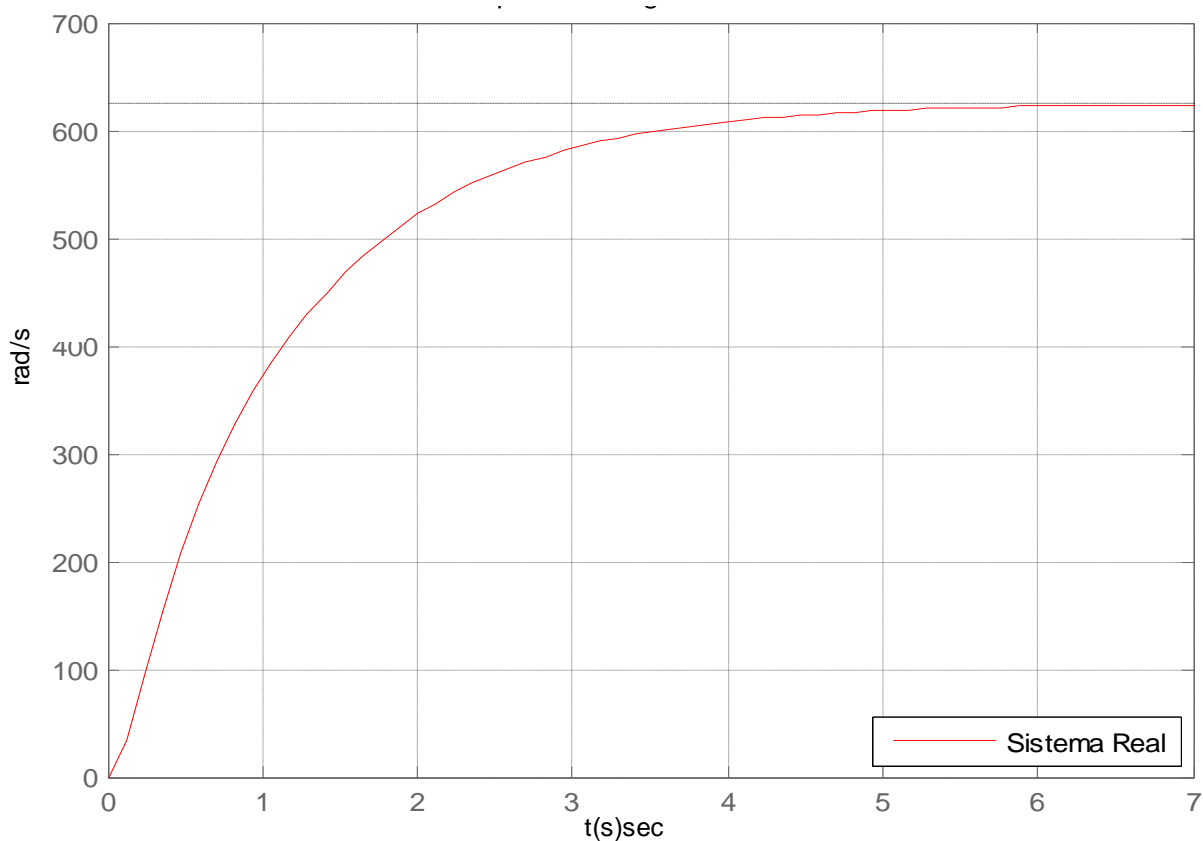
$$C(s) = \frac{0.0005445 \cdot s^2 + 0.2723 \cdot s + 1.043}{0.02352 \cdot s^3 + 0.3425 \cdot s^2 + 1.447 \cdot s + 1.043} \cdot R(s)$$

Transformando rpm para rad/s temos $\frac{625}{s}$. Substituindo $R(s)$.

$$C(s) = \frac{0.0005445 \cdot s^2 + 0.2723 \cdot s + 1.043}{0.02352 \cdot s^3 + 0.3425 \cdot s^2 + 1.447 \cdot s + 1.043} \cdot \frac{625}{s} \quad (9)$$

Como resposta da função de transferência (9), temos a seguinte resposta ao degrau do sistema. O Gráfico 3.43 mostra a resposta.

Gráfico 3.43 – Resposta ao degrau do sistema da simulação 3



Para entrada foi utilizada uma entrada de 625 rad/s onde pode verificar no gráfico 3.42 o sinal de entrada é igual a sinal de saída.

Utilizando a simulação 6, dado uma entrada 7200 rpm. A figura 3.17 mostra o diagrama de blocos.

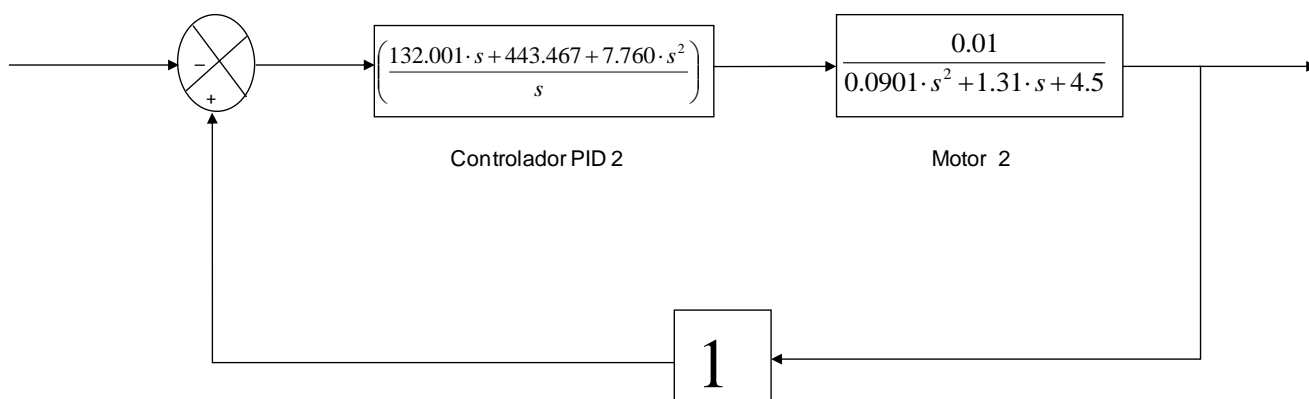


Figura 3.17 – Sistema de controle – Simulação 5

Temos a seguinte função de transferência:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0.0776 \cdot s^2 + 4.435 \cdot s + 1.32}{0.0901 \cdot s^3 + 1.388 \cdot s^2 + 8.935 \cdot s + 1.32}$$

Temos,

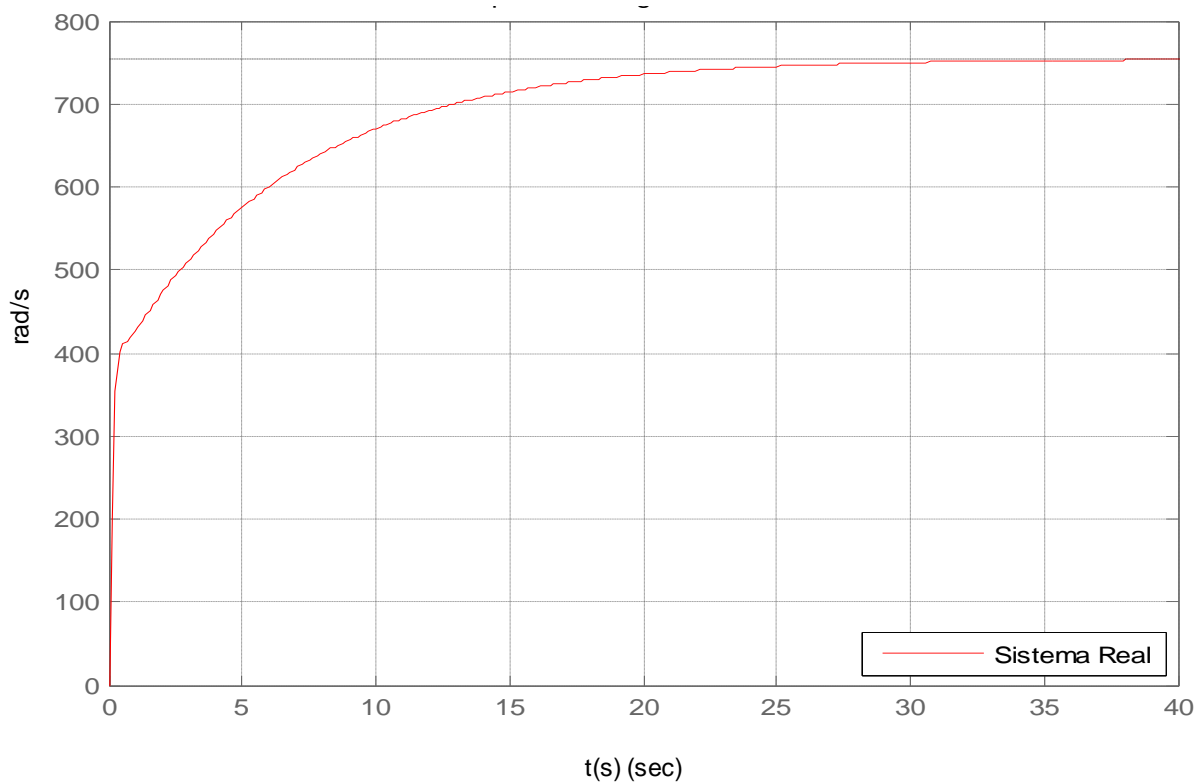
$$C(s) = \frac{0.0776 \cdot s^2 + 4.435 \cdot s + 1.32}{0.0901 \cdot s^3 + 1.388 \cdot s^2 + 8.935 \cdot s + 1.32} \cdot R(s)$$

Substituindo a R(s) por 754 rad/s

$$C(s) = \frac{0.0776 \cdot s^2 + 4.435 \cdot s + 1.32}{0.0901 \cdot s^3 + 1.388 \cdot s^2 + 8.935 \cdot s + 1.32} \cdot \frac{754}{s} \quad (10)$$

Como resposta da função de transferência (10), temos a seguinte resposta ao degrau do sistema. O gráfico 3.44 mostra a resposta.

Gráfico 3.44 – Resposta ao degrau do sistema da simulação 5



Para entrada foi utilizada uma entrada de 754 rad/s onde pode verificar no gráfico 3.42 o sinal de entrada é igual a sinal de saída.

Utilizando a simulação 6, dado uma entrada 120°. A figura 3.18 mostra o diagrama de blocos.

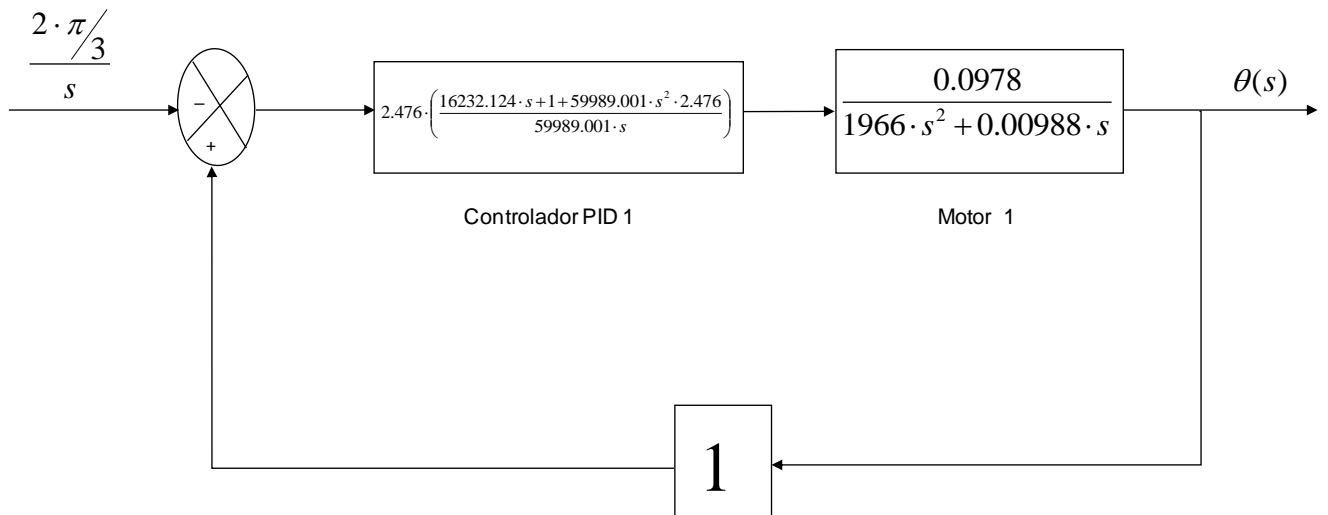


Figura 3.18 – Sistema de controle – Simulação 6

Temos a seguinte função de transferência:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{235800000 \cdot s^2 + 14530 \cdot s + 0.2422}{17900000 \cdot s^3 + 235800000 \cdot s^2 + 14530 \cdot s + 0.2422}$$

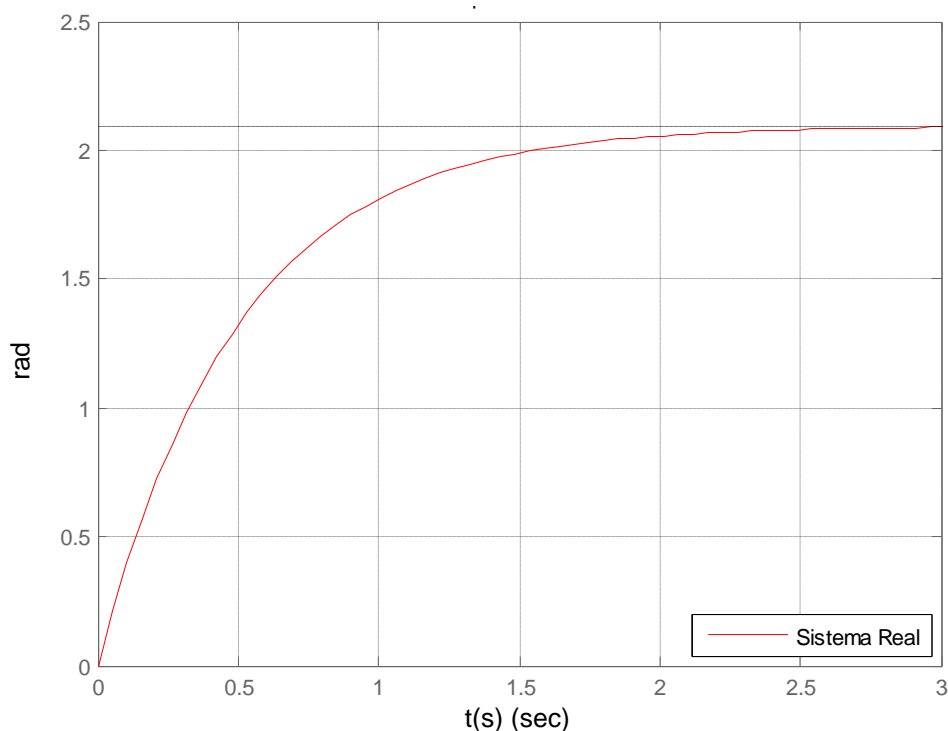
Temos,

$$C(s) = \frac{235800000 \cdot s^2 + 14530 \cdot s + 0.2422}{17900000 \cdot s^3 + 235800000 \cdot s^2 + 14530 \cdot s + 0.2422} \cdot R(s)$$

Substituindo o $R(s)$ por $\frac{2\pi/3}{s}$

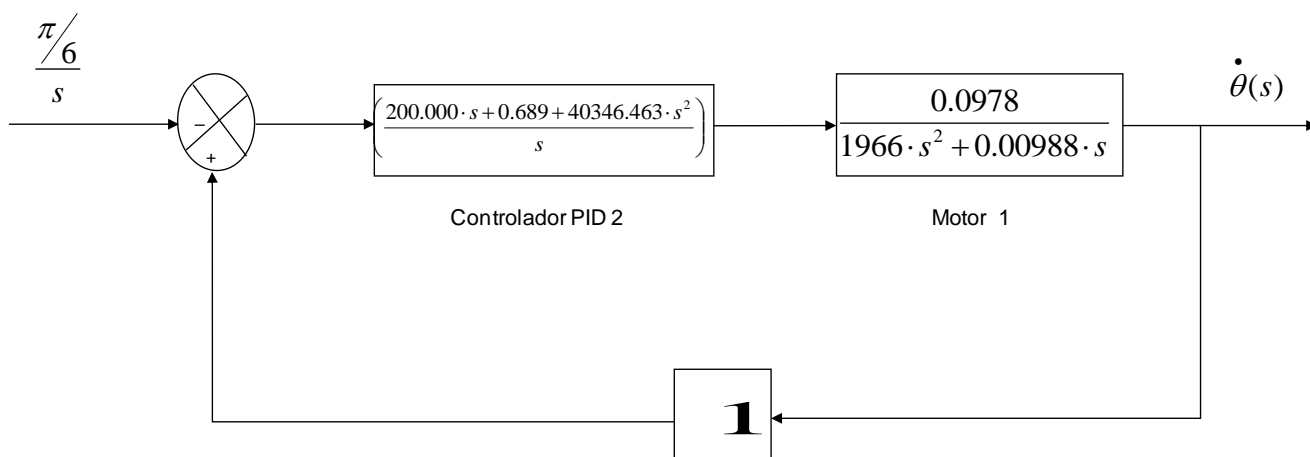
$$C(s) = \frac{235800000 \cdot s^2 + 14530 \cdot s + 0.2422}{17900000 \cdot s^3 + 235800000 \cdot s^2 + 14530 \cdot s + 0.2422} \cdot \frac{2 \cdot \pi / 3}{s} \quad (11)$$

Como resposta da função de transferência (11), temos a seguinte resposta ao degrau do sistema. O gráfico 3.45 mostra a resposta.

Gráfico 3.45 – Resposta ao degrau do sistema da simulação 6

Para entrada foi utilizada uma entrada de $\frac{2\pi}{3}$ onde pode verificar no gráfico 3.44 o sinal de entrada é igual a sinal de saída.

Utilizando a simulação 8, dado uma entrada 30° . A figura 3.19 mostra o diagrama de blocos.

**Figura 3.19 – Sistema de controle – Simulação 8**

Temos a seguinte função de transferência:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{3946 \cdot s^2 + 19.56 \cdot s + 0.06738}{1966 \cdot s^3 + 3946 \cdot s^2 + 19.56 \cdot s + 0.06738}$$

Temos,

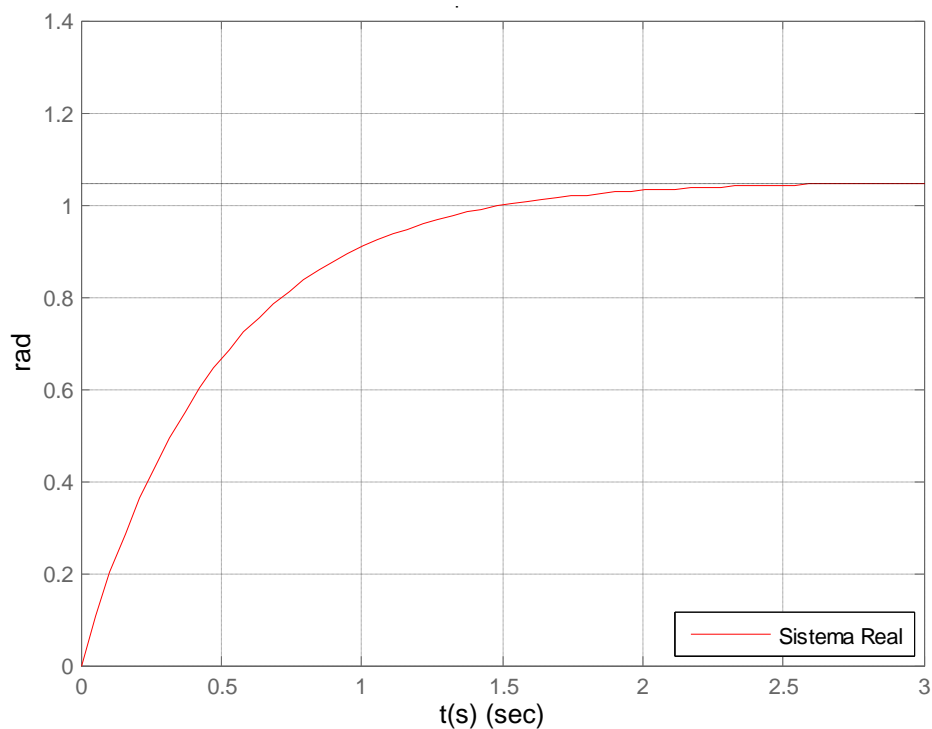
$$C(s) = \frac{3946 \cdot s^2 + 19.56 \cdot s + 0.06738}{1966 \cdot s^3 + 3946 \cdot s^2 + 19.56 \cdot s + 0.06738} \cdot R(s)$$

Substituindo o $R(s)$ por $\frac{\pi/6}{s}$

$$C(s) = \frac{3946 \cdot s^2 + 19.56 \cdot s + 0.06738}{1966 \cdot s^3 + 3946 \cdot s^2 + 19.56 \cdot s + 0.06738} \cdot \frac{\pi/6}{s} \quad (12)$$

Como resposta da função de transferência (12), temos a seguinte resposta ao degrau do sistema. O gráfico 3.46 mostra a resposta.

Gráfico 3.46 – Resposta ao degrau do sistema da simulação 8



Para entrada foi utilizada uma entrada de $\frac{\pi}{6}$ onde pode verificar no gráfico 3.45 o sinal de entrada é igual a sinal de saída.

Os códigos fontes utilizados para realização do trabalho encontra-se descrito no Apêndice A.

CAPÍTULO 4 - CONCLUSÃO

4.1 Conclusão

O presente trabalho se baseia na utilização dos Algoritmos Genéticos para a otimização do controlador PID com o intuito de obter uma solução sub-ótima para os parâmetros do controlador, sendo esta proveniente da minimização da função objetiva, que foi minimizar a norma infinita, da diferença entre o sistema de malha fechada real e o sistema de malha fechada ideal.

O sistema de malha fechada real é um sistema que envolve o controlador PID atuando no modelo de motor de corrente contínua. O sistema de malha fechada ideal, por sua vez, é um sistema que tem, como resposta ao degrau unitário, uma saída que se deseja que o sistema de malha fechada real apresente.

Para garantir a estabilidade, a robustez e a eficiência do sistema, os parâmetros do controlador sofreram restrições quanto ao pólo da função, à norma infinita e à quantidade de gerações.

A partir das respostas encontradas nos exemplos estudados, pode-se concluir que os parâmetros encontrados para o controlador PID pelo Algoritmo Genético apresentou soluções satisfatórias. Para a solução foi encontrada rapidamente, demorando apenas no ajustes da configuração dos parâmetros dos AGs.

Dado a diversidade de controladores PID existentes os modelos estudados tiveram características diferentes, porém apresentando ajustes e comportamentos agradáveis. Para implementar um controlador PID na prática pode ser observado o custo e a facilidade de implementação.

Para a implementação de um sistema de malha fechada deve ser relevante qual o controlador PID, o motor de corrente contínua, a constante de tempo que deve ter como resposta ao sistema.

Com base nas experiências realizadas, foi possível concluir que o uso dos Algoritmos Genéticos produz excelentes resultados e é de fácil implementação computacional. A metodologia adotada também permite sugerir seções iniciais de dimensionamento que podem ser utilizadas na prática pelos projetistas em sistemas elétricos. Assim, o trabalho aqui apresentado contribuirá para que a engenharia automatize o ajuste de parâmetros do controlador PID de maneira que não mais se

utilize para tal objetivo a tentativa e erro. Conseqüentemente, o tempo de ajuste do controlador será reduzido.

O objetivo principal do projeto, de busca de um método de ajustar o controlador que não seja a tentativa e erro, foi alcançado com êxito. A modelagem, o ajuste dos parâmetros do Algoritmo Genético, a otimização, bem como a realização dos testes obtendo resultados satisfatórios permitem concluir, portanto, que aplicação prática do projeto é viável.

4.2 Análise do Projeto

O objetivo apresentado de ajustar o controlador PID utilizando Algoritmos Genéticos foi realizado com sucesso. O método demonstrou-se eficaz ao robustecer os parâmetros do controlador utilizando uma norma infinita obtida pela minimização da diferença entre os sistemas ideal e real. A metodologia utilizada permitiu obter ótimos parâmetros que aproximassem ao máximo as características dos sistemas real e ideal.

Para garantir a estabilidade do sistema real foi estabelecida a restrição de que todos os pólos devem estar à esquerda do semiplano s .

Dada a diversidade de características dos controladores PID existentes, os controladores selecionados apresentaram resultados satisfatórios.

4.3 Dificuldades encontradas

A grande dificuldade foi a quantidade de variáveis para ajustar os parâmetros do Algoritmo Genético, assim como entender o seu funcionamento. Outra dificuldade foi encontrar uma função de transferência para o motor de corrente contínua e fazer a modelagem do sistema de malha fechada.

4.4 Sugestões de trabalhos futuros

Como desenvolvimentos futuros podem ser considerados os seguintes aspectos:

- Otimizar um sistema de malha fechada utilizando um motor de corrente alternada;
- Otimizar um sistema de malha fechada utilizando um motor de passo;

- Estudo de convergências e critérios de parada para dos AGs.
- Implementar o sistema de malha fechada na pratica.
- Fazer uma comparação com outros métodos de otimização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENTO, Celso Roberto, **Sistema de Controle: Teoria e projetos**. São Paulo: Érica, 1963.

BEZERRA JUNIOR, José Julimá. **Ajuste de controladores com vista à robustez paramétrica**. Dissertação de Mestrado, IMI, 2004.

CASTRO, L. Chong Lee Bacelar de, **Algoritmo genético para otimização de estruturas reticuladas**. Dissertação de Mestrado, Unb, 2005.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H.. **Sistemas de controle modernos**. Trad. Bernardo Severo da Silva Filho. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

FITZGERALD, A. E., Kingsley Jr, CARLES., StephenD. **Máquinas Elétricas**. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006

GILAT, Amos. **MATLAB com aplicação em engenharia**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

LEMONS, Ricardo Martins **Ambiente para otimização de redes Multímedia Utilizando Algoritmo genético**. Dissertação de Mestrado, Unb, 2008. p. 91.
MESNER, B., TILBURY, D. **Control Tutorials for Matlab**. University of Michigan, 1996. Disponível em: <<http://www.krellinst.org/UCES/archive/classes/control/control.html>> Acesso em: 18 outubro. 2008.

NUNES, Luiz Eduardo N. do P.; ROSADO, Vitor Orlando G. **Ajuste dos parâmetros do controlador proporcional, integral e derivativo através de algoritmos genéticos**. *In*: Rev. ciênc. exatas, Taubaté, v. 9/10, n. 1-2 p. 47-52. Disponível em: <www.agro.unitau.br/exatas/ojs/include/getdoc.php?id=83&article=25&mode=pdf>.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. trad. Paulo Alvaro Maya; rev. técn. Fabrizio Leonardi. 4. Ed. São Paulo : Prentice Hall, 2003.

PACHECO, M. A. C. **Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações**. Disponível em: <<http://www.ica.ele.puc-rio.br>>. Acesso em: 18 outubro. 2008.

PHILLIPS, Charles L.; NAGLE, H. Troy **Digital control System analysis and desing**.. 3rd ed.: Prentice Hall, 1995.

PHILLIPS, Charles L., HARBOR , Royce D.,**Sistema de controle e realimentação**. Trad. Luiz Fernando Ricardo; revisor técnico Antônio Pertence Jr. São Paulo: Markron Books,1996.

APÊNDICE – A

```

%*****
%* Santos, Hugo de Souza; 2009 *
%* Ra: 2032790-2 *
%* *
%* Descrição da Função: A função objetiva sera a função *
%* constante passada para o algoritmo genetico. Função do *
%* ajuste. *
%* Chamada a Função: [ninf] = objetiva(k) *
%* Parâmetros: K *
%* *
%* *****

function [ninf] = objetiva(K)

% *** Função de Transferencia de Malha Fechada do sistema Real
[hr]= Malha_Fechada_Transferencia(K);
% * Retorna a função de Transferencia do Sistema Real

% *** Função de Transferencia do Sistema Ideal de Malha Fechada
[hi] =sistema_ideal();
% * Retorna a função de Transferencia do Sistema Ideal

% *** Norma do ajuste - Sera o função de transferencia ideal menos a
% função de transferencia Real
H=hi-hr;

% * Ajuste de Parada para o algoritmo genetico.
if pole(hr)>=0
    ninf = 12000;
else
    ninf=norm(H,inf);
end

%*****
%* Santos, Hugo de Souza; 2009 *
%* Ra: 2032790-2 *
%* *
%* Descrição da Função: Controlador PID *
%* Chamada a Função: [num1,den1]=controlador_pid(k) *
%* Parâmetros: K *
%* *
%* k(1) -> KP(Proporcional) *
%* K(2) -> Ti(Integral) *
%* K(3) -> Td (Derivativo) *
%* *****

function [num1,den1,PID]=controlador_pid(K)

control = '2';
%Numerador e o demominador da função do controlador PID;
switch control
    case '1'

```



```

        num1=[(K(2)*K(3)*K(1)) (K(3)*K(1)) K(1)];
        den1=[0 K(2) 0];
        PID= ' Controlador - 1\n';
    case '2'

        num1 = [K(3) K(1) K(2)];
        den1 = [0 1 0];
        PID = ' Controlador - 2 \n';
End

%*****
%* Santos, Hugo de Souza; 2009 *
%* Ra: 2032790-2 *
%* *
%* Descrição da Função: Os modelos Motor de Corrente *
%* Continua *
%* Chamada a Função: [num1,den1]=controlador_pid(k) *
%* Parâmetros: *
%* Função:  $K/(J*s^2*L+J*s*R+b*L*s+b*R+k^2)$  *
%* *****

function [num2,den2,MCC]= motor_corrente_continua()
Motor = '2';
switch Motor
    case '1'
        %* Modelo de Motor de Mesner e Tilbury - Rotação
        % J *** Momento de inércia do rotor
            J=0.1;
        % B *** Razão de amortecimento do sistema mecânico
            b=0.9;
        % K *** Constante de força eletromotriz ( $K = K_e = K_t$ ) = 0.01 Nm/Amp
            K=0.01;
        % R *** Resistência
            R=5;
        % L *** Indutância
            L=0.9;
        % *** Função da planta do motor Corrente Continua numerador e
            %Denominador ***
            num2=[0 0 K];
            den2=[(J*L) ((J*R)+(b*L)) (b*R)]+ (K^2);
            MCC = ' Motor Corrente Continua - 1\n';
    case '2'
        % Descrição da Função: Representa a função de Transferencia do
        % motor quando a saída é a posição do eixo e a entrada é a tensão
        % de armadura.

        %* Ra - Resistencia de armadura
            Ra=12.6;
        %* Indutância de armadura
            La = 14.3;
        %* Constante de f.c.e.m
            kb = 9.78 * 10^(-2);
        %* Momento de Inércia do rotor
            J = 156 + 10^(-6);
        %* Constante de Torque
            k = 9.78 * 10^(-2);
        %* Coeficiente de Atrito
            f= 25*10^(-6);
        % *** Função da planta do motor Corrente Continua numerador e
            %Denominador ***
            num2=[0 0 k];

```

```

den2=[(Ra*J) ((Ra*f)+(k*kb)) 0];
MCC = ' Motor Corrente Continua - 2\n';

End

%*****
%* Santos, Hugo de Souza; 2009 *
%* Ra: 2032790-2 *
%* *
%* Descrição da Função: Obter a funções de transferencia em *
%* cascata, em paralelo e com realimentação (Malha Fechada) *
%* Chamada a Função: [K]= Malha_Fechada_Transferencia(K) *
%* Retorno: Sera o valor na norma *
%* Parâmetros: *
%* *
%* *****
function [hr,PID,MCC]= Malha_Fechada_Transferencia(K)

% *** Função de Transferencia de Malha Fechada do sistema Real

% * Chamada a Função do Controlador PID
[num1,den1,PID]=controlador_pid(K);

% * Chamada a Função do motor de corrente Continua
[num2,den2,MCC]=motor_corrente_continua();

% * Serie Controlador PID + Motor de Corrente Continua
[nums,dens]=series(num1,den1,num2,den2);

% * Realimentação do sistema
[num3,den3]=realimentacao();

% * Paralelo entre o Controlador PID + Motor de Corrente Continua +
% Realimentação
[num,den]=feedback(nums,dens,num3,den3);

% * Retorna a função de Transferencia do Sistema Real
hr= tf(num,den);

%*****
%* Santos, Hugo de Souza; 2009 *
%* Ra: 2032790-2 *
%* *
%* Descrição da Função: Realimentação do sistema *
%* Chamada a Função: [num3,den3]=realimentacao() *
%* Retorno: num3 e den3 *
%* Parâmetros: *
%* *
%* *****
function [num3,den3]=realimentacao()

% *** Função para realimentação do Sistema Real.
num3 = [0 0 1];
den3 = [0 0 1];

%*****

```

```

%* Santos, Hugo de Souza; 2009 *
%* Ra: 2032790-2 *
%* *
%* Descrição da Função: Sistema Ideal para a compração *
%* Chamada a Função: [hi] =sistema_ideal() *
%* Retorno: Sera o valor na norma *
%* Parâmetros: *
%* *
%* *****

```

```

function [hi,SI] =sistema_ideal()
Ideal = '2';
% *** Numerador e Denominador da função Ideal.
switch Ideal
    case '1'
        nu=[0 0 1];
        de=[0 1 1];
        SI='Ideal - 1';
    case '2'
        nu=[0 0 1];
        de=[0 0.5 1];
        SI='Ideal - 2';

end
%* Função de transferencia da função Ideal.
hi= tf(nu,de);

```

```

%*****
%* Santos, Hugo de Souza; 2009 *
%* Ra: 2032790-2 *
%* *
%* Descrição da Função: Sistema para a verificação *
%* da entrada com a saída *
%* Chamada a Função: Motor_Ang_1 *
%* Parâmetros: *
%* *
%* *****
function [hr]= Motor_Ang_1()

```

```

% Entrada do sistema R(s)

% Variavel

%* Modelo de Motor de Corrente Continua- Para Angulo.

    %* Ra - Resistencia de armadura
    Ra=12.6;
    %* Indutância de armadura
    La = 14.3;
    %* Constante de f.c.e.m
    kb = 9.78 * 10^(-2);
    %* Momento de Inércia do rotor
    J = 156 + 10^(-6);
    %* Constante de Torque
    k = 9.78 * 10^(-2);
    %* Coeficiente de Atrito
    f= 25*10^(-6);

```

```
%Configura o Modelo do controlador PID 1
```

```
% Proporcional
Kp = 2.476;
% Integral
Ti = 16232.124;
% Derivativo
Td = 59989.001;
```

```
% *** Função da planta do Controlador PID *** numerador e Denominador ***
```

```
num1=[(Ti*Td*Kp) (Td*Kp) Kp];
den1=[0 Td 0];
```

```
% Motor de angulo
```

```
num2=[0 0 k];
den2=[(Ra*J) ((Ra*f)+(k*kb)) 0];
```

```
% Realimentação
```

```
% *** Função para realimentação do Sistema Real.
num3 = [0 0 1];
den3 = [0 0 1];
```

```
% Montando a função de transferência do sistema de malha fechada
```

```
% * Serie Controlador PID + Motor de Corrente Continua
[nums,dens]=series(num1,den1,num2,den2);
```

```
% * Paralelo entre o Controlador PID + Motor de Corrente Continua +
Realimentação
[num,den]=feedback(nums,dens,num3,den3);
```

```
% Entrada do sistema
```

```
%[num4,den4]= series(num,den,nu,de);
```

```
% * Retorna a função de Transferencia do Sistema Real
```

```
% Função de transferencia
hr= tf(num,den);
```

```
%Entrado do sistema de angulo R(s)
h=hr*((2*pi)/3);
```

```
% Plotando o Grafico
```

```
step(h,'r')
grid
title('Curvas de Resposta ao - Sistema Real')
ylabel('Ângulo')
xlabel('t(s)')
```

```

h=legend('Sistema Real',4);
set( h , 'Interpreter','none');

%*****
%* Santos, Hugo de Souza; 2009 *
%* Ra: 2032790-2 *
%* *
%* Descrição da Função: Sistema para a verificação *
%* da entrada com a saída *
%* Chamada a Função: Motor_Vel_1 *
%* Parâmetros: *
%* *
%* *****

function [hr]= Motor_Vel_1()

% Variavel
%* Modelo de Motor de velocidade pela tensão

% J *** Momento de inércia do rotor
J=0.1;
% B *** Razão de amortecimento do sistema mecânico
b=0.9;
% K *** Constante de força eletromotriz (K = Ke = Kt) = 0.01 Nm/Amp
K=0.01;
% R *** Resistência
R=5;
% L *** Indutância
L=0.9;

%Configura o Modelo do controlador PID 1

% Kp - Proporcional
Kp = 104.314;
% Td - Derivativo
Td = 0.261;
% Ti - Integral
Ti = 0.002;

% *** Função da planta do Controlador PID *** numerador e Denominador ***

num1=[(Ti*Td*Kp) (Td*Kp) Kp];
den1=[0 Td 0];

% Motor de Velocidade

% *** Função da planta do motor Corrente Continua *** numerador e
Denominador ***
num2=[0 0 K];
den2=[(J*L) ((J*R)+(b*L)) (b*R)]+ (K^2);

% Realimentação

% *** Função para realimentação do Sistema Real.
num3 = [0 0 1];
den3 = [0 0 1];

```

```

% Montando a função de transfência do sistema de malha fechada

% * Serie Controlador PID + Motor de Corrente Continua
[nums,dens]=series(num1,den1,num2,den2);

% * Paralelo entre o Controlador PID + Motor de Corrente Continua +
Realimentação
[num,den]=feedback(nums,dens,num3,den3);

% * Retorna a função de Transferencia do Sistema Real

% Função de transferencia
hr= tf(num,den);

% Entrada do sistema R(s)

h=hr*625;

% Plotando o Grafico

step(h,'r')
grid
title('Curvas de Resposta ao degrau unitário - Sistema Real')
ylabel('rpm')
xlabel('t(s)')
h=legend('Sistema Real',4);
set( h , 'Interpreter','none');

%*****
%* Santos, Hugo de Souza; 2009 *
%* Ra: 2032790-2 *
%* *
%* Descrição da Função: Sistema para a verificação *
%* da entrada com a saída *
%* Chamada a Função: Motor_Vel_2 *
%* Parâmetros: *
%* *
%* *****
function [hr]= Motor_Vel_2()

% Variavel

%* Modelo de Motor de Mesner e Tilbury - Para velocidade.
% J *** Momento de inércia do rotor
J=0.1;
% B *** Razão de amortecimento do sistema mecânico
b=0.9;
% K *** Constante de força eletromotriz (K = Ke = Kt) = 0.01 Nm/Amp
K=0.01;
% R *** Resistência
R=5;
% L *** Indutância
L=0.9;

```

```

% Modelo do controlador PID 2.

% Controlador ajustado para a Planta Ideal 1 1 segundo
%132.001      443.467      7.760
% Kp - Proporcional
    Kp = 132.001;
% Td - Derivativo
    Td = 7.760;
% Ti - Integral
    Ti = 443.467;

% *** Função da planta do Controlador PID *** numerador e Denominador ***

    num1=[Td Ti Kp];
    den1=[0 1 0];

% Motor de Velocidade

% *** Função da planta do motor Corrente Continua *** numerador e
Denominador ***
    num2=[0 0 K];
    den2=[(J*L) ((J*R)+(b*L)) (b*R)]+(K^2);

% Realimentação

% *** Função para realimentação do Sistema Real.
    num3 = [0 0 1];
    den3 = [0 0 1];

% Montando a função de transferência do sistema de malha fechada

% * Serie Controlador PID + Motor de Corrente Continua
[nums,dens]=series(num1,den1,num2,den2);

% * Paralelo entre o Controlador PID + Motor de Corrente Continua +
Realimentação
[num,den]=feedback(nums,dens,num3,den3);

% * Retorna a função de Transferencia do Sistema Real

% Função de transferencia
hr= tf(num,den);
%* Para a entrada ser igual a 120 rpm
h=hr*754;
% Plotando o Grafico

step(h,'r')
grid
title('Curvas de Resposta ao degrau unitário - Sistema Real')
ylabel('rpm')
xlabel('t(s)')
h=legend('Sistema Real',4);
set( h , 'Interpreter','none');

```

```

%*****
%* Santos, Hugo de Souza; 2009 *
%* Ra: 2032790-2 *
%* *
%* Descrição da Função: Sistema para a verificação *
%* da entrada com a saída *
%* Chamada a Função: Motor_Ang_1 *
%* Parâmetros: *
%* *
%* *****
function [hr]= Motor_Ang_2()
% Entrada do sistema R(s)

% Variavel

%* Modelo de Motor de Corrente Continua- Para Angulo.

%* Ra - Resistencia de armadura
Ra=12.6;
%* Indutância de armadura
La = 14.3;
%* Constante de f.c.e.m
kb = 9.78 * 10^(-2);
%* Momento de Inércia do rotor
J = 156 + 10^(-6);
%* Constante de Torque
k = 9.78 * 10^(-2);
%* Coeficiente de Atrito
f= 25*10^(-6);

%Configura o Modelo do controlador PID 1

% Proporcional
Kp =200.000;
% Integral
Ti = 0.689;
% Derivativo
Td = 40346.463;

% *** Função da planta do Controlador PID *** numerador e Denominador ***

num1 = [Td Kp Ti];
den1 = [0 1 0];

% Motor de angulo

num2=[0 0 k];
den2=[(Ra*J) ((Ra*f)+(k*kb)) 0];

% Realimentação

```



```

% *** Função para realimentação do Sistema Real.
num3 = [0 0 1];
den3 = [0 0 1];

% Montando a função de transferência do sistema de malha fechada

% * Serie Controlador PID + Motor de Corrente Continua
[nums,dens]=series(num1,den1,num2,den2);

% * Paralelo entre o Controlador PID + Motor de Corrente Continua +
Realimentação
[num,den]=feedback(nums,dens,num3,den3);

% Entrada do sistema
[num4,den4]= series(num,den,nu,de);
% * Retorna a função de Transferencia do Sistema Real

% Função de transferencia
hr= tf(num,den);

%Entrado do sistema de angulo R(s)
h=hr*(pi/3);

% Plotando o Grafico

step(h,'r')
grid
title('Curvas de Resposta ao - Sistema Real')
ylabel('Ângulo')
xlabel('t(s)')
h=legend('Sistema Real',4);
set( h , 'Interpreter','none');

```

